



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV VÝKONOVÉELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**VÝPOČET TEPLOTNÍCH POLÍ
V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH**

CALCULATION OF TEMPERATURE FIELD IN ELECTRICAL MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL VIDLÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARCEL JANDA, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Michal Vidlák

ID: 174247

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet teplotních polí v elektrických strojích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou výpočtů teplot v asynchronních strojích
2. Vytvořte zjednodušený model elektrického stroje
3. Na vytvořeném modelu proveďte výpočet rozložení teploty pomocí MKP a výsledky porovnejte s naměřenými hodnotami

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] STŘEDA, Ivo. Termodynamika: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1991, 149 s. ISBN 80-010-0452-X.

[2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 31.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou výpočtu teplotních polí v elektrických strojích. Jsou zde shrnuty tři metody výpočtu. Metoda konečných prvků v programu Ansys, dále analytický výpočet metodou teplotních odporů a měření reálného stroje.

Klíčová slova

Výpočet teplotních polí; metoda konečných prvků; metoda teplotních odporů; rozložení teploty pomocí metody konečných prvků; Ansys Workbench; elektrické stroje.

Abstract

This work deals with the calculation of temperature fields in electrical machines. There are summarized three methods of calculation. Finite Element Method in Ansys, next the calculation method of thermal resistances and measurement of the real machine.

Keywords

Calculation of temperature fields; Finite Element Method; thermal resistance method; temperature distribution; Ansys Workbench; electric machines.

Bibliografická citace:

VIDLÁK, M. *Výpočet teplotních polí v elektrických strojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 47 s.
Vedoucí semestrální práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Výpočet teplotních polí v elektrických strojích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 31. května 2017

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 31. května 2017

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Termika elektrických strojů a Materiálové vlastnosti.....	2
2.1	Materiálové vlastnosti.....	3
3	Přenos tepla	5
3.1	Vedením (kondukcí)	5
3.2	Prouděním (konvekcí).....	5
3.3	Záření.....	6
4	Výpočet teplotních polí	7
4.1	Vedení.....	7
4.2	Proudění	8
4.3	Odporová metoda	9
4.4	Metoda konečných prvků (MKP)	13
5	Asynchronní stroj, konstrukce, chlazení a ztráty	15
5.1	Konstrukce	15
5.2	Chlazení	16
5.3	Ztráty	17
6	Měření teploty.....	20
6.1	Kontaktní.....	20
6.2	Bezkontaktní.....	22
7	Teplotní charakteristiky	24
7.1	Oteplovací charakteristika	24
7.2	Ochlazovací charakteristika.....	24
8	Měření	26
8.1	Simulace v programu Ansys	26
8.2	Měření reálného zatíženého asynchronního motoru	32
8.3	Analytický výpočet teplot.....	35
9	Srovnání metod	40
	Závěr.....	44
	Literatura.....	45
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	46

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vedení tepla přes jednu stěnu	7
Obrázek 2: Sdílení tepla prouděním	8
Obrázek 3: Náhradní tepelné schéma asynchronního stroje	12
Obrázek 4: Náhradní tepelné schéma třech stěn	12
Obrázek 5: Zkonstruované tři stěny vloženy na sebe v programu ANSYS	14
Obrázek 6: Zapojení svorkovnice do hvězdy a do trojúhelníka	15
Obrázek 7: Znázornění toku výkonu asynchronním motorem	17
Obrázek 8: Blokové schéma termokamery	23
Obrázek 9: Oteplovací charakteristika	24
Obrázek 10: Ochlazovací charakteristika	25
Obrázek 11: 3D model asynchronního motoru	26
Obrázek 12: A) Model uzavřený funkcí enclosure B) Model při použití funkce Mesh	27
Obrázek 13: Oteplovací charakteristika motoru bez z chlazení	28
Obrázek 14: Rozložení teplotního pole v čase $t = 588$ s	28
Obrázek 15: Rozložení teplotního pole v čase $t = 1848$ s	29
Obrázek 16: Rozložení teplotního pole v čase $t = 4200$ s	29
Obrázek 17: Příčný řez motorem a okolím v čase $t = 4200$ s	30
Obrázek 18: Oteplovací charakteristika motoru	30
Obrázek 19: Rozložení teplotního pole v čase $t = 588$ s	31
Obrázek 20: Rozložení teplotního pole v čase $t = 1848$ s	31
Obrázek 21: Rozložení teplotního pole v čase $t = 4200$ s	32
Obrázek 22: Příčný řez motorem a okolím v čase $t = 4200$ s	32
Obrázek 23: 3D model motoru s ukázkou měřících bodů	33
Obrázek 24: Oteplovací charakteristika obou bodů měření	33
Obrázek 25: Vypočítaná oteplovací charakteristika obou bodů	34
Obrázek 26: Snímek z termokamery A) v čase $t = 600$ s B) v čase $t = 1800$ s	34
Obrázek 27: Snímek z termokamery A) v čase $t = 3000$ s B) v čase $t = 4200$ s	35
Obrázek 28: Náhradní tepelný obvod statoru při konstantní teplotě okolního vzduchu	35
Obrázek 29: Porovnání reálné a teoretické oteplovací charakteristiky v bodě měření č.1	40
Obrázek 30: Porovnání reálné a teoretické oteplovací charakteristiky v bodě měření č.2	40
Obrázek 31: Srovnání oteplovací charakteristiky z laboratorního měření a ze simulace v Ansys	41
Obrázek 32: Srovnání všech oteplovacích charakteristik	42

Obrázek 33: Teplota čel vinutí motoru	42
---------------------------------------------	----

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehledová tabulka převodů mezi základními jednotkami teploty	3
Tabulka 2: Teplotní materiálové vlastnosti	4
Tabulka 3: Rozsahy teplot a přesnosti termočlánků	22
Tabulka 4: Hodnoty ztrát a generace tepla	27
Tabulka 5: Hodnoty teplot ze snímků termokamery	35
Tabulka 6: Hodnoty pro výpočet tepelných odporů	37
Tabulka 7: Vypočtené hodnoty teplot a tepelných toků	39

1 ÚVOD

V elektrickém stroji dochází ke vzniku tepelných jevů a ty mohou ohrozit závažně jeho funkci. Proto je důležitý výpočet teplotních polí.

V této práci je řešen výpočet teplotních polí v elektrickém stroji různými metodami. Jsou použity analytické a simulační metody, které jsou následně porovnány. Tyto měření jsou důležité z důvodu správné vyrobené konstrukce nových strojů. Při přesáhnutí provozní teploty stroje zde hrozí porušení izolace, nebo jiných materiálů. Tím by se mohl zničit celý stroj. Pro výpočty teplotních polí lze využívat různé metody, díky jejichž výsledkům je možno předejít poruchám stroje ještě před jeho vyroběním.

Základem této práce byl reálný 3D model sestavený v programu Autodesk Inventor 2017. Tento model je následně použit v programu Ansys Workbench, kde lze provádět simulace pro řešení mnoha inženýrských problémů. V této práci byl proveden výpočet rozložení teplotního pole v asynchronním motoru po určitém čase.

Jako další metoda je měření přímo na reálném motoru v laboratoři. Zde se bude měřit povrchová teplota asynchronního motoru při chodu. Teplota se bude měřit na dvou místech kostry termočlánkem a pro přibližné porovnání taky termokamerou. Z těchto výsledků je možno sestavit oteplovací charakteristiku stroje a porovnat ji s teoretickou hodnotou oteplení a taky výsledky analýzy z metody konečných prvků. Jako další výpočet je zde určení teploty v motoru pomocí tepelných toků mezi součástmi asynchronního motoru. Výsledky lze opět porovnat s analýzou z programu Ansys Workbench metodou konečných prvků.

2 TERMIKA ELEKTRICKÝCH STROJŮ A MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

Během funkce elektrického stroje dochází k přeměně části elektrické energie v tepelnou. Tato tepelná energie vznikající při chodu stroje ohřívá okolní části stroje a zvyšuje jejich teplotu. Toto zvyšování teploty ve stroji může snížit pevnost izolace vinutí. Tepelné děje uvnitř elektrických strojů vycházejí ze základních zákonů termodynamiky.

- **Nultý zákon termodynamiky**
Pokud jsou dvě a více těles v termodynamické rovnováze s dalším tělesem, tak jsou všechny tyto tělesa v rovnováze.
- **První zákon termodynamiky**
Zákon zachování energie. Vnitřní energie systému (U) se zvýší, když mu okolí dodá teplo (Q). A klesne, pokud systém vykoná práci (W).
- **Druhý zákon termodynamiky**
Při nevratném ději roste entropie uzavřeného systému. Při vratném ději zůstává stálá. V uzavřeném systému entropie neklesá. [3]

Na úvod je potřeba si vyjasnit některé základní pojmy, které se vyskytují v termice elektrických strojů. Základní pojmy jsou:

Teplo

Teplo (označováno: Q) je přenesená energie mezi systémem a okolím s různými teplotami. Změna jejich teplot je způsobena změnou vnitřní energie. Je to dějová veličina. Můžeme ho chápat jako kladné i záporné. Kladné je, když do systému dodáme teplo a záporné, když je mu odebráno. Jeho jednotkou je Joul. [3]

Teplota

Je to stavová veličina. Udává stav hmoty. Charakterizuje, jestli látka při tepelném kontaktu s další látkou bude v tepelné rovnováze, nebo nebude. Teplota (označovaná: T) je jednou ze základních jednotek SI soustavy. Její základní jednotka je Kelvin. Nejmenší možná teplota je $0K$, což se rovná $-273,15\text{ }^{\circ}C$. [3]

Tabulka 1: Přehledová tabulka převodů mezi základními jednotkami teploty

	Kelvin [K]	Stupeň Celsia [°C]	Stupeň Fahrenheita [°F]
Kelvin [K]	-	$T_{[C]} + 273,15$	$273,15 + (T_{[F]} - 32) / 1,8$
Stupeň Celsia [°C]	$T_{[K]} - 273,15$	-	$(T_{[F]} - 32) / 1,8$
Stupeň Fahrenheita [°F]	$1,8 \times (T_{[K]} - 273,15) + 32$	$1,8 \times T_{[C]} + 32$	-

2.1 Materiálové vlastnosti

V termodynamice patří mezi důležité parametry výpočtu materiálové vlastnosti. Ty nám udávají chování materiálu při různých teplotách. Například strukturní změny materiálů, tím se mění mechanické a deformační vlastnosti, jako třeba tuhost a pevnost. Záleží, jak daný materiál je schopen vést teplo. Základními vlastnostmi zde jsou:

Tepelná kapacita

Tepelná kapacita předmětu je konstanta úměrnosti mezi změnou jeho teploty a teplem dodaným do tělesa. Určuje kolik tepla je třeba předmětu dodat, aby se jeho teplota zvýšila např. o jeden kelvin. Značí se (C) a její jednotkou je [J.K⁻¹]. [3]

$$Q = C \cdot (T_2 - T_1) \quad [J] \quad (2.1)$$

Kde

C	...	tepelná kapacita	[J.K ⁻¹]
Q	...	dodané teplo	[J]
T ₂	...	koncová teplota	[K]
T ₁	...	počáteční teplota	[K]

Měrná tepelná kapacita

Vyjadřuje tepelnou kapacitu na jednotku hmotnosti. Určuje, kolik tepla je třeba dodat, aby se jeden kilogram látky ohřál o jeden teplotní stupeň. Značí se (c) a má jednotku [J.K⁻¹.kg⁻¹]. Rovnice (2.1) se může přepsat ve tvaru: [3]

$$Q = c.m.(T_2 - T_1) \quad [J] \quad (2.2)$$

Kde

c	...	měrná tepelná kapacita	[J.K ⁻¹ .kg ⁻¹]
Q	...	dodané teplo	[J]
m	...	hmotnost	[kg]
T ₂	...	koncová teplota	[K]
T ₁	...	počáteční teplota	[K]

Tepelná vodivost

Udává schopnost látky vést teplo. Popisuje, jaké množství tepla dokáže v ustáleném stavu přenést za jednotku času v daném prostředí. Podle součinitele tepelné vodivosti (λ) lze porovnávat látky a rozdělit od sebe tepelné vodiče a tepelné izolanty. Tepelný vodič je látka, která má hodnotu součinitele tepelné vodivosti větší než 0,1 W.m⁻¹.K⁻¹. Součinitel tepelné vodivosti (λ) je konstanta popisující materiál. Pro dobrý tepelný vodič je potřeba mít vysokou hodnotu součinitele tepelné vodivosti a nízký tepelný odpor. Mezi nejlepší tepelné vodiče patří např. Stříbro, měď nebo hliník. [2], [4], [5]

Tabulka 2: Teplotní materiálové vlastnosti

Materiál	λ	c
	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Olovo	35	128
Hliník	237,5	900
Měď	400	386
Stříbro	428	236
Železo	79	465

3 PŘENOS TEPLA

Děj, který se uplatňuje u všech elektrických strojů. Je to přenos tepelné energie. Které nastává, když například objekt má jinou teplotu než další objekt v okolí. V tom případě začne přenos tepelné energie mezi součástmi. Z teplejšího tělesa do studenějšího, dokud nedojde k teplotní rovnováze.

Přenos tepla probíhá třemi základními způsoby:

- vedením
- prouděním
- zářením

V reálné praxi se setkáváme nejčastěji se všemi typy přenosů tepla v různých kombinacích. [10][3][11]

3.1 Vedením (kondukcí)

Přenos probíhá ve směru klesající teploty. Jako příklad lze uvést tyč, která je jedním koncem položena například v ohni. Na jednom konci bude horká a na druhém studená. Začne se tedy přenášet energie z ohřáté strany až na druhý konec tyče. Amplitudy kmitů atomů a elektronů tvořících kovovou tyč se v ohni zvětší díky vysoké teplotě. Tento nárůst amplitud kmitání spolu s energií se šíří podél celé tyče od atomu k atomu. Prostřednictvím srážek sousedních atomů. Takto se ohřátá oblast rozšiřuje až na druhý konec. Rychlost takto vedeného tepla určuje tepelná vodivost. Protože záleží na materiálu. Vedení se rozděluje na:

- Ustálené (stacionární) – teplotní rozdíly mezi částmi tělesa se nemění
- Neustálené (nestacionární) - teplotní rozdíly mezi částmi tělesa se vyrovnávají [3]

3.2 Prouděním (konvekcí)

Proudění se vyskytuje u plynů a tekutin. Jev nastává, když je tekutina ve styku s nějakým předmětem, který má vyšší teplotu. Při tomto styku předává teplejší předmět teplo chladnějším částem tekutiny. [3]

Tento přenos se dělí na:

- **Přirozené**

Nejjednodušší příklad přirozeného proudění vzniká například u radiátorů. V tomto případě je obvykle jako médium vzduch. Zde se tedy vzduch dostává do styku

s radiátorem, který má vyšší teplotu. Teplota vzduchu ve styku s tímto předmětem tedy roste a toto médium se začne roztahovat, čím se snižuje jeho hustota. Snížením hustoty se stává lehčím, než okolní chladnější vzduch a vlivem tlaku začne stoupat vzhůru. Chladnější část se dostane na jeho místo, kde se opět zahřeje a celý děj se pak opakuje. [3]

- Nucené

Zde je tekutina uváděna do pohybu pomocí ventilátoru, čerpadla nebo jiného zařízení, aby se nanasla na těleso, se kterým vyměňuje teplo. Uplatňuje se například k chlazení asynchronních strojů. [10][11]

3.3 Záření

Tento přenos tepla se provádí prostřednictvím elektromagnetických vln. Pro tento přenos není potřeba žádné hmotné prostředí. Výkon vyzařujícího tělesa (P_r) závisí na jeho povrchu (S) a teplotě (T). Je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem: [3]

$$P_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad [\text{W}] \quad (3.1)$$

Kde

ε	...	emisivita	[-]
σ	...	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W]
S	...	povrch tělesa	[m ²]
T	...	teplota	[K]

Z této rovnice 3.1 vyplývá, že každý předmět může být zdrojem záření. Příjmuté záření těleso z části odrazí, přijme a absorbuje. Následně se přemění na tepelnou energii. Absolutně černé těleso je takové, které všechnu energii pohltí.

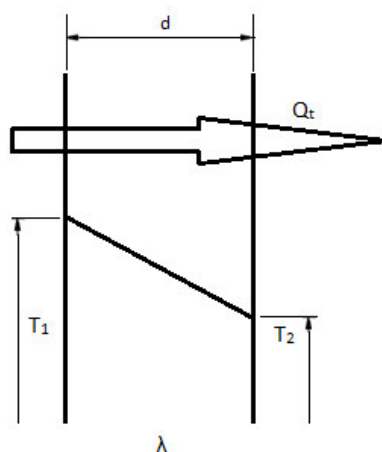
4 VÝPOČET TEPLOTNÍCH POLÍ

Jako příklad pro výpočet přenosu tepla je možné použít například složenou stěnu z různých materiálů. Na kterých se může ukázat postup výpočtu pro tepelná pole. V této práci jsem jako příklad výpočtů používal tři stěny. Jejich parametry jsou: Jednotlivé materiály jsou hliník, měď a železo. Stěny mají tloušťky $d_1 = 0,15$ m, $d_2 = 0,11$ m, $d_3 = 0,05$ m a všechny mají plochu $0,4 \times 0,8$ m. Jejich součinitele tepelné vodivosti jsou $\lambda_{Al} = 237,5$ W.m⁻¹.K⁻¹, $\lambda_{Cu} = 400$ W.m⁻¹.K⁻¹, $\lambda_{Fe} = 79$ W.m⁻¹.K⁻¹. $T_1 = 313,15$ K, $T_4 = 288,15$ K.

4.1 Vedení

V případě přenosu tepla stěnou se jedná o vedení.

Nejjednodušším příkladem pro výpočet je vedení tepla jednou stěnou:



Obrázek 1: Vedení tepla přes jednu stěnu

Pro výpočet se využívá tepelného toku. Velikost tepelného toku je dána vztahem:

$$Q_t = \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta T \cdot S \quad [J] \quad (4.1)$$

Kde

Q_t	...	velikost tepelného toku	[J]
λ	...	součinitel tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
d	...	tloušťka desky	[m]
S	...	plocha desky	[m ²]
ΔT	...	rozdíl teplot na jedné a druhé straně desky	[K]

Příklad pro výpočet vedení tepla více stěnami:

Zde je uveden obecný postup pro výpočet tepelného toku složenou stěnou

Pro každou vrstvu lze napsat rovnici (4.1) pro tepelný tok. Ustálený tepelný tok má v každé vrstvě stejnou velikost. Takže si z rovnic pro tepelné toky vyjádříme rozdíly teplot. Sečtením těchto rovnic dostaneme vztah:

$$T_1 - T_n = \frac{Q_t}{S} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \right) \quad (4.2)$$

Ze kterého po vyjádření Q_t dostaneme:

$$Q_T = \frac{T_1 - T_n}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}} \cdot S \quad (4.3)$$

Tento obecný vztah lze zjednodušit zavedením tepelného odporu (R) a součinitele prostupu tepla stěnou (k). Sčítance ve jmenovateli lze vyjádřit jako odpor.

$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (4.4)$$

A pro zjednodušení se používá součinitel prostupu tepla stěnou (k):

$$k = \frac{1}{R} \quad (4.5)$$

Pomocí součinitele prostupu tepla stěnou (k) lze rovnici (4.1) zjednodušit na

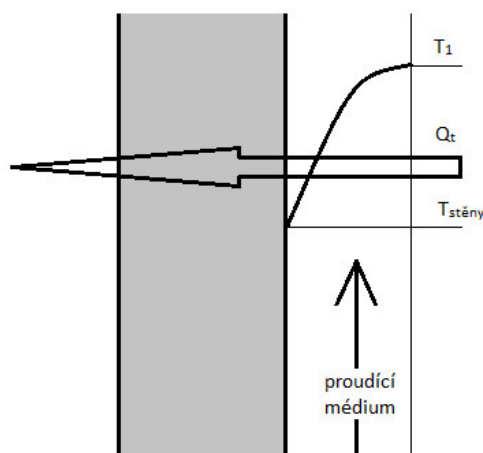
$$Q_T = k \cdot \Delta T \cdot S \quad (4.6)$$

Kde

Q_t	...	velikost tepelného toku	[J]
k	...	součinitel prostupu tepla	[m ² .K/W]
ΔT	...	rozdíl teplot na jedné a druhé straně	[K]
S	...	plocha desky	[m ²]

4.2 Proudění

Dále potřebujeme vypočítat přenos tepla prouděním. Zde je uveden příklad proudění média (například vzduchu) kolem plochy stěny.



Obrázek 2: Sdílení tepla prouděním

Stejně jako u vedení se pro výpočet proudění používá tepelného toku, který je dán vztahem:

$$Q_t = \alpha \cdot S \cdot \Delta T \quad [J] \quad (4.7)$$

Kde

Q_t	...	velikost tepelného toku	[J]
α	...	součinitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
ΔT	...	rozdíl teplot tekutiny a stěny	[K]
S	...	plocha desky	[m ²]

Příklad výpočtu přestupu tepla se započtením proudění. Zde dochází ke sdílení tepla prouděním mezi prostředím a stěnou a ve stěně dochází k přenosu tepla vedením. Teplota prostředí je ustálená a je $T_1 = 293$ K a teplota za stěnou je $T_{s2} = 280$ K. Tato stěna je ze železa její obsah je $S = 1$ m², tloušťka je $d = 0,1$ m a součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{Fe} = 67$ W.m⁻¹.K⁻¹. Součinitel přestupu tepla prostředím před stěnou je $\alpha = 20$ W.m⁻².K⁻¹.

Tepelný tok je v celé části stejný, takže si opět vyjádříme z těchto rovnic teplotní rozdíly:

$$T_1 - T_{s1} = \frac{Q_T}{S \cdot \alpha} \quad (4.8)$$

$$T_{s1} - T_{s2} = \frac{Q_T}{S} \cdot \frac{d}{\lambda_{Cu}} \quad (4.9)$$

Sečtením těchto rovnic dostaneme:

$$T_1 - T_{s2} = \frac{Q_T}{S} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{\lambda_{Fe}} \right) \quad (4.10)$$

Odkud opět vyjádříme Q_T a dosadíme:

$$Q_T = \frac{T_1 - T_{s2}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{\lambda_{Fe}}} \cdot S = \frac{293 - 280}{\frac{1}{20} + \frac{0,1}{67}} \cdot 1 = 252,46 \text{ W}$$

4.3 Odporová metoda

Jedná se o metodu náhradních tepelných obvodů. Využívá tepelné odpory a řeší se analogickým řešením elektrických obvodů. Použitím náhradních tepelných obvodů lze určit střední teploty různých částí elektrického stroje. Každá část tepelného obvodu se vypočítá ze základní rovnice: [7]

$$T_1 - T_2 = P_{12} \cdot R_{12} \quad (4.11)$$

Kde

T_1	...	střední teplota části 1	[K]
T_2	...	střední teplota části 2	[K]
P_{12}	...	tepelný tok mezi body 1 a 2	[W]
R_{12}	...	tepelný odpor mezi body 1 a 2	[K.W ⁻¹]

Čím více prvků, které charakterizují různé části stroje, bude, tím přesnější bude výpočet. Ale náhradní tepelný obvod by byl složitější. Je proto nutné počítat s co největším zjednodušením údajů, ale zároveň s dostatečnou přesností. Složky náhradního tepelného schématu jsou stator, rotor a počítá se i se vzduchovou mezerou. [7]

Stator i rotor se rozděluje se na 3 přibližně stejnorodá tepelná tělesa, která jsou zdroje tepla.

- 1) Drážková část vinutí se ztrátami ΔP_{dr}
- 2) Obě strany čel s celkovými ztrátami $\Delta P_{\check{c}}$
- 3) Železo statoru se ztrátami ΔP_{Fe}

Ve statoru se značí tyto ztráty indexem 1 a v rotoru se značí indexem 2.

Pro stator i rotor se ve schématech používají tepelné odpory:

- Drážkové izolace R_i
- Čel statorového a rotorového vinutí $R_{\check{c}}$
- Drážek statoru a rotoru R_{dr}
- Části od vinutí k chladicímu médiu ve ventilačních kanálech R_{vk}

Odpory se opět značí indexy 1 pro stator a index 2 pro rotor.

Ve vzduchové mezeře se počítá s tepelnou vazbou mezi statorem a rotorem. Je vyjádřena tepelným odporem R_s .

Výpočet jednotlivých tepelných odporů, které se používají v náhradních tepelných schématech: [7]

- 1) Tepelný odpor drážkové izolace

$$R_i = \frac{d_{iz}}{\lambda_i \cdot S_i} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (4.12)$$

Kde

d_{iz}	...	tloušťka drážkové izolace	[m]
S_i	...	plocha izolace	[m ²]
λ_i	...	součinitel tepelné vodivosti izolace	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

- 2) Tepelný odpor čel vinutí

$$R_{\check{c}} = \frac{d_{iz}}{\lambda_i \cdot S_{\check{c}}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} \cdot S_{\check{c}}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (4.13)$$

Kde

d_{iz}	...	tloušťka izolace cívky	[m]
$S_{\check{c}}$...	ochlazovací plocha čel	[m ²]
λ_i	...	součinitel tepelné vodivosti izolace	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
$\alpha_{\check{c}}$...	součinitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

3) Tepelný odpor kovu vinutí

$$R_v = \frac{l + l_{\check{c}}}{12 \cdot Q_i \cdot V_{ef} \cdot S_{ef} \cdot \lambda} = \frac{R'_{dr}}{2} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (4.14)$$

Kde

V_{ef}	...	počet efektivních vodičů v drážce	[m]
λ_i	...	součinitel tepelné vodivosti izolace	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
l	...	osová délka železa statoru	[m]
$l_{\check{c}}$...	délka čela	[m]
Q_i	...	počet drážek statoru	[-]
S_{ef}	...	průřez vodiče	[m ²]
R'_{dr}	...	Tepelný odpor drážky	[K.W ⁻¹]

4) Tepelný odpor části od vinutí k chladicímu vzduchu v radiálních ventilačních kanálech

$$R_{vk} = \frac{d_{iz}}{\lambda_i \cdot S_{vk}} + \frac{1}{\alpha_{vk} \cdot S_{vk}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (4.15)$$

Kde

d_{iz}	...	tloušťka drážkové izolace	[m]
S_{vk}	...	plocha povrchu vinutí v radiálních kanálech	[m ²]
λ_i	...	součinitel tepelné vodivosti izolace	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
α_{vk}	...	součinitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

5) Tepelný odpor od železa statoru nebo rotoru k chladicímu vzduchu

$$R_{Fe} = \frac{1}{\alpha_{er} \cdot S_{er} + \alpha_{ir} \cdot S_{ir}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (4.16)$$

Kde

S_{er}	...	vnější povrch paketů	[m ²]
α_{er}	...	součinitel přestupu tepla vnějšího povrchu paketů	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
S_{ir}	...	vnitřní povrch paketů	[m ²]
α_{ir}	...	součinitel přestupu tepla vnitř. povrchu paketů	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

6) Tepelná vazba mezi statorem a rotorem

$$R_{\delta} = \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot S_{\delta}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (4.17)$$

Kde

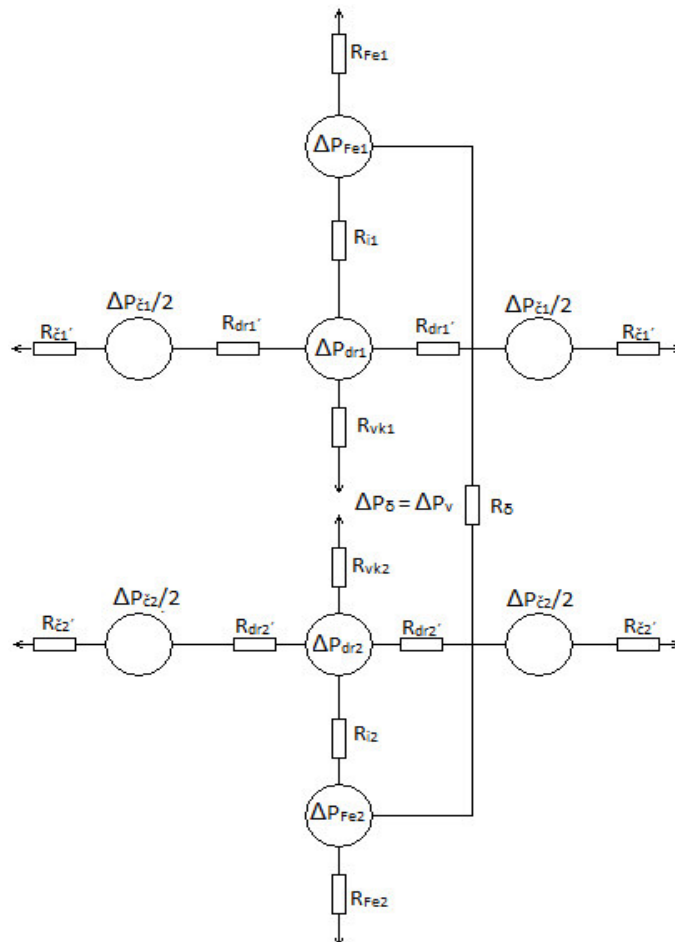
α_{δ}	...	součinitel přestupu tepla vzduchové mezery	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
S_{δ}	...	plocha vzduchové mezery	[m ²]

7) Vyrovnávací tepelný tok

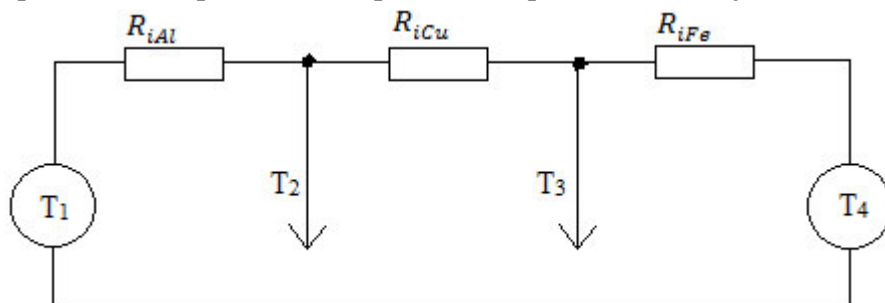
$$P_v = \frac{T_{Fe1} - T_{Fe2}}{R_\delta} \quad [W] \quad (4.18)$$

Kde

T_{Fe1}	...	teplota železa statoru	[K]
T_{Fe2}	...	teplota železa rotoru	[K]
R_δ	...	Tepelná vazba mezi statorem a rotorem	[K.W ⁻¹]



Obrázek 3: Náhradní tepelné schéma asynchronního stroje
Výpočet průchodu tepla stěnami pomocí odporové metody



Obrázek 4: Náhradní tepelné schéma třech stěn

Nejprve se provede výpočet tepelných odporů provedeme ze vztahu (4.12):

$$R_{iAl} = \frac{d_1}{\lambda_{Al} \cdot S}$$

$$R_{iCu} = \frac{d_2}{\lambda_{Cu} \cdot S}$$

$$R_{iFe} = \frac{d_3}{\lambda_{Fe} \cdot S}$$

Potom potřebujeme vypočítat tepelný tok:

$$Q_t = \frac{T_1 - T_4}{R_{iAl} + R_{iCu} + R_{iFe}} \quad (4.19)$$

A teď je možné dopočítat zbývající teploty mezi deskami ze vztahu pro tepelný tok, ze kterého je vyjádřen vztah pro danou teplotu

$$Q_t = \frac{T_1 - T_2}{R_{iAl}} \Rightarrow T_2 = T_1 - Q_t \cdot R_{iAl}$$

$$Q_t = \frac{T_3 - T_4}{R_{iFe}} \Rightarrow T_3 = T_4 + Q_t \cdot R_{iFe}$$

4.4 Metoda konečných prvků (MKP)

Je to numerická metoda k výpočtu rozsáhlého množství problémů. Její vývoj po vzniku závisel na úrovni výpočetní techniky. Metoda původně vznikla pro výpočty návrhu konstrukcí například v leteckém, vesmírném, vojenském a jaderném průmyslu. A odsud se MKP rozšířila do akademického prostředí a do průmyslu. Mezi ostatními numerickými postupy má dnes již dominantní postavení. Používala se k řešení problémů dynamiky a pružnosti. Ale rozšířila se i na řešení proudění kapalin, vedení tepla, záření atd. [11]

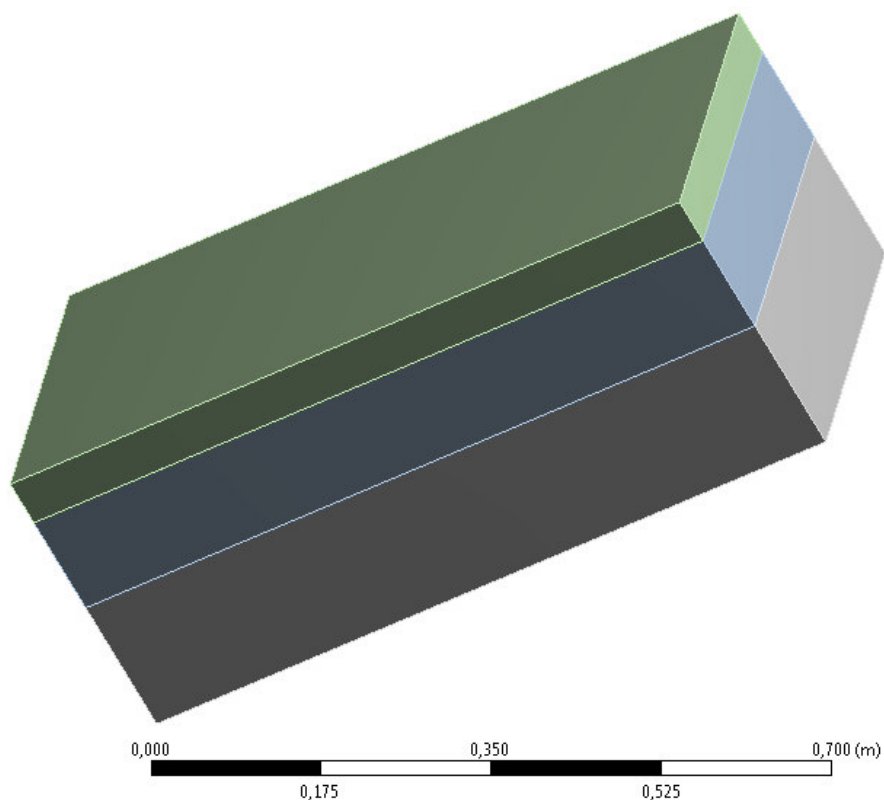
MKP využívají různé systémy. Zde se používá systém ANSYS, který mi provede analýzu teplotních polí v asynchronním motoru. [11]

Základním stavebním kamenem je zde konečné množství rozměrů. Řešená oblast se tedy rozdělí na konečný počet oblastí. Takto se na tělese vytvoří síť bodů, kde hledáme neznámé parametry řešení. Kvalita výsledku je hodně ovlivněna hustotou a topologií prvků sítě. Čím více bodů se vytvoří, tím je taky výpočet složitější a těžší na výpočet. [11]

Program ANSYS Workbench

Je založen na MKP a využívá se k řešení široké škály teplotních polí. Dokáže provádět hodně různých analýz. Ansys má v sobě zabudováno veliké množství funkcí k analýze dosažených výsledků. V tomto projektu se používá nastavba

programu Ansys Workbench, která má zjednodušené uživatelské prostředí pro inženýrskou praxi. Je určen pro řešení mnoha problémů z fyzikálních polí. [12]
Jako první krok je potřeba mít model, na kterém chceme provést analýzu. Model se zde nemusí vytvářet, ale je možné ho importovat z CAD systému (například Autodesk Inventor nebo Solidworks). V dalším kroku se zadávají materiálové vlastnosti a vytvoření meshe. Potom se nastaví okrajové podmínky a provede se analýza. [12]



Obrázek 5: Zkonstruované tři stěny vloženy na sebe v programu ANSYS

5 ASYNCHRONNÍ STROJ, KONSTRUKCE, CHLAZENÍ A ZTRÁTY

Patří do skupiny elektrických strojů, které provádí elektromechanickou přeměnu energie. Asynchronní stroje se dělí na:

- motory, které mění elektrickou energii na mechanickou
- generátory, které přeměňují mechanickou energii na elektrickou.

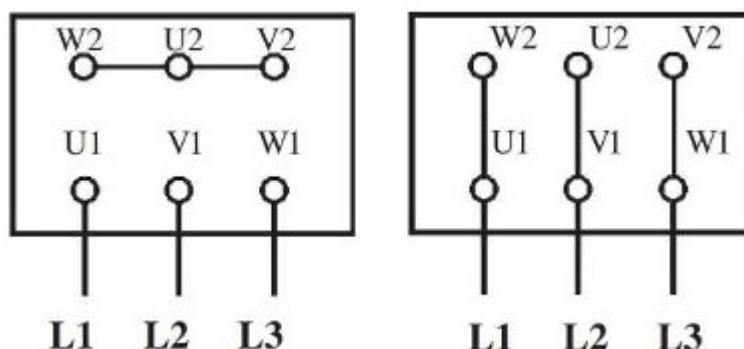
Tento typ strojů se používá ve většině aplikací jako motory a jedná se o nejrozšířenější elektromotor v elektrotechnice. A to díky jejich jednoduchosti, ceně, spolehlivosti a nepotřebnosti velké údržby. Jeho největší nevýhody jsou špatná regulace rychlosti, ale je možné to vyřešit měničem. [1]

5.1 Konstrukce

- Konstrukce asynchronního motoru je jednoduchá, protože se skládá jen z mála prvků a to statoru, rotoru, kostry motoru, ventilátoru, statorového a rotorového vinutí a ložisek. [1]

Základní části jsou:

Kostra – Většinou je tvořena odlitkem s dutinou na stator a z obou stran je uzavřena ložiskovými štíty. Na kostře je uložena svorkovnice, na kterou jsou vyvedeny začátky a konce vinutí. Svorkovnice bývá uspořádána tak aby se vinutí třífázového motoru dalo zapojit jak do hvězdy, tak i do trojúhelníku.



Obrázek 6: Zapojení svorkovnice do hvězdy a do trojúhelníka

Na kostře také bývají umístěna žebra. Která slouží k odvodu tepla.

Stator – Stator je pevná část motoru. Uvnitř kostry statoru jsou nalisovány na sebe elektrotechnické plechy, které tvoří část magnetického obvodu motoru. Plechy mají v sobě drážky, kde je uloženo vinutí, většinou třífázové vinutí. Které je uloženo tak aby byly fáze otočeny oproti sobě o 120°. [1], [7]

Rotor – Pohyblivá část motoru. Rotor se skládá z elektrotechnických plechů, které jsou nalisovány na hřídeli. Ta se otáčí v ložiskách. Má dva typy vinutí:

S vinutou kotvou – Tento typ vinutí je uložen v drážkách stejně jako ve statoru. Je uložen v drážkách rotorových plechů. Začátek i konec vinutí je vyvedený na sběrné kroužky rotoru. Používá se při regulaci otáček motoru, ale kvůli konstrukčnímu uspořádání se už nepoužívá moc často.

S kotvou nakrátko – Zde jsou místo vinutých drátů do drážek uloženy hliníkové nebo měděné tyče, které jsou na obou koncích spojeny. Tento typ je častější a používá se u motorů větších výkonů.
[1],[7],[8]

Ložiska – Jsou vložena v ložiskových štítech. Umožňují rotaci rotoru a omezují tření hřídele při otáčení a vymezují polohu rotoru ve statoru. Vznikají v nich ztráty třením. [1],[8]

Ventilátor - Bývá uložený na hřídeli. Vytváří proudění vzduchu, který proudí přes žebra stroje a odvádí teplo ze stroje. Motor může mít i jiný typ chlazení (například vodní chlazení). [8]

5.2 Chlazení

Působením ztrát, které vznikají v elektrickém stroji vzniká i teplo. Pro správný chod stroje je nutné navrhnout správné chlazení. To bude při chodu stroje snižovat teplo, které vzniká vlivem ztrát. A tím také prodlužuje životnost stroje a sníží možnost poruchy izolace. Způsoby chlazení lze rozdělit do dvou skupin: [9]

Aktivní

Teplo je odváděno prouděním chladícího média, které je vytvářeno ventilátorem nebo čerpadlem. Tento typ chlazení má velkou účinnost, takže se dá použít u strojů vysokých výkonů.

U aktivního chlazení je možné použít různá média, např.:

- Vzduch - jedná se o nejpoužívanější médium
- Kapalina - nejpoužívanější médium je voda nebo olej
- Speciální plyny - používá se pouze ve speciálních případech
- médium je například helium nebo vodík [9]

Pasivní

Z povrchu stroje se teplo odvádí pouze přirozeným prouděním a zářením. Hlavní výhodou je tedy jednoduchost a nepotřebnost ventilátoru. Tento typ chlazení má menší účinnost než aktivní a lze tedy použít jen u malých strojů nízkých výkonů.

[9]

5.3 Ztráty

Při chodu motoru vznikají různé ztráty. Ztráty vznikají v každé části elektrického stroje, kde se část přivedené energie mění na energii tepelnou. Která se přenesou do okolí a ovlivňuje funkce daného zařízení. Ovlivňuje například odpor vodičů a magnetické charakteristiky jednotlivých součástí. Takže přivedený výkon do motoru není stejný jako výkon na hřídeli. Poměr výstupního a vstupního výkonu udává účinnost (η).

Účinnost:

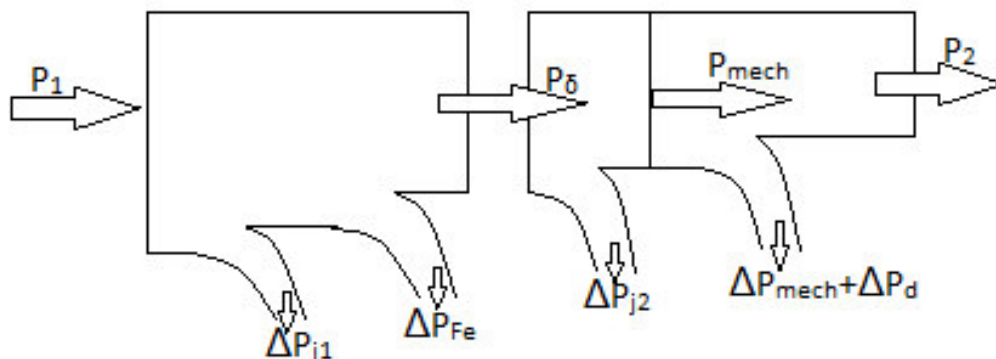
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad [-] \quad (5.1)$$

Kde

η	...	účinnost	$[-]$
P_1	...	příkon	$[W]$
P_2	...	výkon na hřídeli	$[W]$

Tok výkonu asynchronním motorem

Na vstupu motoru je příkon (P_1). Ten je dán součtem Joulových ztrát ve statoru a ztrát v železe s výkonem procházejícím vzduchovou mezerou (P_δ). Který se rovná mechanickému výkonu (P_{mech}) sečteným s Joulovými ztrátami v rotoru. Když od mechanického výkonu odečteme mechanické a dodatečné ztráty, tak dostaneme už jen výkon na hřídeli P_2 .



Obrázek 7: Znázornění toku výkonu asynchronním motorem

Výpočet celkových ztrát

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \quad [W] \quad (5.2)$$

Kde

P_1	...	příkon	[W]
P_2	...	výkon na hřídeli	[W]
ΔP_{j1}	...	Joulový (činný) ztráty ve vinutí statoru	[W]
ΔP_{j2}	...	Joulový (činný) ztráty ve vinutí rotoru	[W]
ΔP_{Fe}	...	Ztráty v železe	[W]
ΔP_{mech}	...	Mechanické ztráty	[W]
ΔP_d	...	Ztráty dodatečné	[W]

Joulový ztráty (ΔP_j)

Jsou to ztráty ve vinutích rotoru a statoru. Protože vinutí má určitý odpor, kde se při průchodu proudu mění část energie na teplo. [1]

Tyto ztráty možné určit ze vztahu:

$$\Delta P_j = m \cdot R \cdot I^2 \quad [W] \quad (5.3)$$

Kde

m	...	počet fází	[-]
R	...	odpor vinutí	[Ω]
I	...	proud	[A]

Ztráty v železe (ΔP_{Fe})

Vznikají ve střídavém magnetickém poli. Vznikají zde ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Tyto ztráty závisí na materiálu šířce plechů, frekvenci a maximální hodnotě magnetické indukce. Tyto ztráty se počítají zvlášť pro ztráty vířivými proudy a pro hysterezní ztráty: [1][6]

Hysterezní ztráty:

$$\Delta P_H = B^2 \cdot f \quad [W] \quad (5.4)$$

Kde

B	...	velikost magnetické indukce	[T]
f	...	frekvence magnetování	[Hz]

Vířivé ztráty:

$$\Delta P_V = B^2 \cdot f^2 \quad [W] \quad (5.5)$$

Kde

B	...	velikost magnetické indukce	[T]
f	...	frekvence magnetování	[Hz]

Mechanické ztráty (ΔP_{mech})

Tyto ztráty vznikají třením hřídele v ložiskách a u kroužkových motorů třením kartáčů o kroužky. Dále jsou to ztráty třením okolního vzduchu na točivou část elektrického stroje a taky výkon pro pohon ventilátoru. Jsou závislé na otáčkách.
[6][1]

Ztráty dodatečné (ΔP_d)

Jsou to ztráty vyššími harmonickými složkami a výřivými proudy okolo vinutí.
[6]

6 MĚŘENÍ TEPLOTY

Měřením teploty v elektrických strojích jsou získány hodnoty teplot, které jsou na různých místech povrchu nebo uvnitř stroje. Měření se provádí většinou sledováním teploty v delším časovém intervalu. Z těchto měření lze sledovat oteplovací nebo ochlazovací děje ve stroji. Pro zvýšení přesnosti výsledků je nutné měření vícekrát opakovat nebo měřit více čidla zároveň. Při opakování měření, ale je složité zajistit stejné podmínky, takže se měří oteplení.

Pro měření teploty jsou využívány dvě hlavní skupiny:

- Kontaktní
- Bezkontaktní

6.1 Kontaktní

Měření se provádí umístěním teplotních čidel přímo na části stroje. Kde čidla měří teplotu na povrchu. Čidla se umísťují přímo na místo, kde je potřeba sledovat teplotu.

Senzory pracují na principu převodu neelektrické veličiny na elektrickou. Jsou založeny na různém fyzikálním principu funkce. Například změna hodnoty odporu při změně teploty.

Výhody kontaktního měření:

- Jednoduché použití
- Snadné umístění
- Nízká cena
- Měření nezávisí na povrchu umístění čidla
- Rychlá odezva čidla

Nevýhody bezkontaktního měření:

- Je nutné připojit vodiče k senzoru
- Obtížné měření na pohybujících částech
- V některých případech složité umístění, nutné zasáhnutí do konstrukce

Nejvíce používané kontaktní senzory pro měření teploty:

- Odporové
- Indikátory teploty
- Termoelektrické senzory

O odporové senzory

Tyto senzory teploty využívají změnu odporu materiálu, který se mění s teplotou podle známých charakteristik. Jako odporové senzory se používají kovové a polovodičové senzory.

- Polovodičové odporové senzory

Tyto senzory jsou založené na principu polovodičových součástek. U polovodičových senzorů je koncentrace nosičů náboje na teplotě dominantní závislostí. Při zvýšení teploty se zde elektrický odpor sníží.

Patří sem:

- Termistory (negistory, pozistory)
- Monokrystalické senzory (Si, SiC)

- Kovové odporové senzory

Zde je opět princip závislosti teploty na odporu kovu. Většinou se při zvýšení teploty odpor kovů zvyšuje. Pro kovové odporové senzory se nejčastěji používají materiály:

- Platina
- Nikl
- Měď

Indikátory teploty

Indikátory se používají pouze pro přibližné určení teploty těles. Teplota se stanovuje ze znalosti kritické teploty. To je teplota, při které se změní vzhled indikátoru (např. tvar nebo barva). Přesnost měření indikátorem je dána závislostí rozdílů prostředí pro kalibraci indikátoru a prostředím, ve kterém probíhá měření. Na odchylce teploty má vliv má složení atmosféry i tlak. Mezi důležité parametry indikátorů teplot je rychlost ohřevu. U barevných indikátorů se používají vratné a nevratné zvraty. U vratných indikátorů teploty se po zchladnutí vrátí do výchozího stavu. Jako indikátory teploty se používají:

- Nálepky
- Peletky
- Tužky

Termoelektrické senzory

Říká se jim také termočlánky. Tyto senzory využívají Seebeckova jevu. Je to jev, při kterém se tepelná energie mění na elektrickou. Tento jev vzniká tak, že nositelé náboje teplejší části vodiče mají větší energii než v chladnějším vodiči. Takže pronikají do chladnějších míst více než chladnější do teplejších. Tím vznikne jednostranná převaha kladných nebo záporných nábojů. Podle toho, kterých nábojů je víc, se určuje znaménko Seebeckových koeficientů.

Termoelektrický článek se skládá ze dvou vodičů (pásků nebo drátů) z různých kovů. Tyto vodiče jsou na jednom konci spojené. Na tomto konci je potřeba udržovat konstantní teplotu při měření. Změnou teploty mezi rozpojenými konci se začne v termočlánu vytvářet malé termoelektrické napětí.

Termočlánky se rozdělují například podle kalibrací. Které nejčastěji jsou označeny J, K, T a E. Rozsahy teplot a přesnosti termočláneků jsou zaznamenány v tabulce.

Tabulka 3: Rozsahy teplot a přesnosti termočláneků

Kalibrace	Teplotní rozsah	Standartní přesnost	Výběrová přesnost
J	0°C až 750°C	Více než 2,2°C nebo 0,75%	Více než 1,1°C nebo 0,4%
K	-200°C až 1250°C	Více než 2,2°C nebo 0,75%	Více než 1,1°C nebo 0,4%
E	-200°C až 900°C	Více než 1,7°C nebo 0,5%	Více než 1,0°C nebo 0,4%
T	-250°C až 350°C	Více než 1,0°C nebo 0,75%	Více než 0,5°C nebo 0,4%

Rozdělují se také podle spoje materiálů. Nejvíce se používají tři druhy spojení.

- Nechráněný spoj
- Zemněný spoj
- Neuzemněný spoj

6.2 Bezkontaktní

Při bezkontaktním měření se sleduje povrchová teplota těles, které vysílají elektromagnetické záření tělesem. To je přijímané detektorem záření o vlnových délkách od 0,4 μm do 25 μm .

Velikost, jak moc povrch různých těles vyzařuje, udává emisivita. Hodnoty emisivity pro různé materiály jsou většinou uvedeny v tabulkách, ale i přesto je nutné před měřením tuto hodnotu ověřit. Protože ne vždy bude tabulková hodnota správná. Povrch může být nějak znečištěný nebo na něm může být koroze, ale nejvíce záleží na samotném povrchu tělesa.

Dalším důležitým vlivem při měření teploty je propustnost okolí. To je kvalita prostředí, ve kterém se šíří záření. Může to ovlivňovat například prach, kouř nebo mlha. Čím je nižší viditelnost v prostředí, tím se infračervené světlo šíří hůř a na kratší vzdálenost. Těmto vlivům se musí měření přizpůsobovat, ale některé přístroje mohou tyto jevy sami kompenzovat.

Bezkontaktní měření má různé metody. Jedna metoda se zakládá na zaznamenání vyzařování z povrchu materiálu. Měření může probíhat v jednom nebo více bodech povrchu. Nebo zaostřuje vyzařovanou teplotu v jednom detektoru uvnitř měřicího přístroje. Základním přístrojem pracujícím na tomto principu je pyrometr.

Další metodou je zaznamenávání celého povrchu stroje do jednoho digitálního snímku. Snímek je dále možno analyzovat ve speciálních softwarech. Kde je možno měnit parametry měření a provádět analýzu teplotního pole. Tohoto principu využívají termokamery. Pro bezkontaktní měření teploty se tedy využívají hlavně:

- Pyrometry
- Termokamery

Výhody bezkontaktního měření:

- Měření na větší vzdálenost
- Změření celého povrchu tělesa v jednom okamžiku
- Měření rychlých změn teploty
- Měření na pohybujících objektech

Nevýhody bezkontaktního měření:

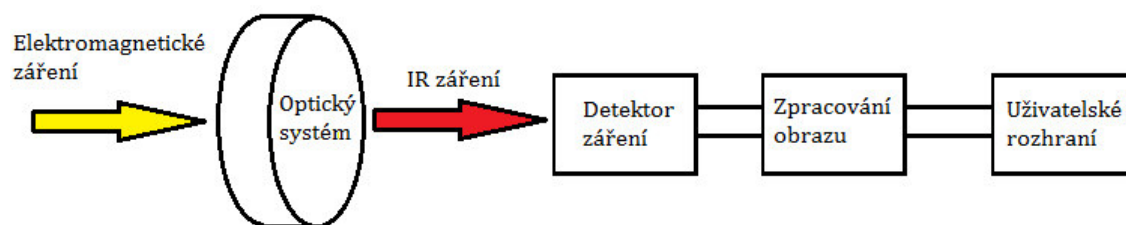
- Problémy s odražením teploty na lesklých částech
- Nutnost určit správnou emisivitu povrchu
- Nepřesné měření
- Závislost na prostředí

Pyrometr

Zaostřuje vyzařovanou teplotu do jednoho detektoru uvnitř přístroje. Umožňuje rychlé měření, ale obtížně dosáhne přesných hodnot teploty. Protože je měření ovlivněno hodně faktory (např. vzdálenost od povrchu, úhel naklonění pyrometru nebo prostupnost okolí). Používají se spíše pro rychlé a přehledové měření teploty na malé vzdálenosti.

Termokamery

Pro měření zaznamenává celý povrch stroje do jednoho digitálního snímku, který lze potom dále analyzovat. V dnešní době se používají nejvíce digitální termokamery, kvůli možnostem následné analýzy pomocí počítače.



Obrázek 8: Blokové schéma termokamery

7 TEPLOTNÍ CHARAKTERISTIKY

7.1 Oteplovací charakteristika

Nejvyšší možná teplota stroje je dána celkovými ztrátami, ochlazovací konstantou a chlazením povrchu. Pokud je znám způsob chlazení stroje a chladicí povrch, je nejvyšší hodnota oteplení úměrná ztrátám. Se zvyšujícím zatížením se zvyšuje i teplota. Oteplovací charakteristiky mají logaritmický průběh. A je dán vztahem:

$$T = T_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad [K] \quad (7.1)$$

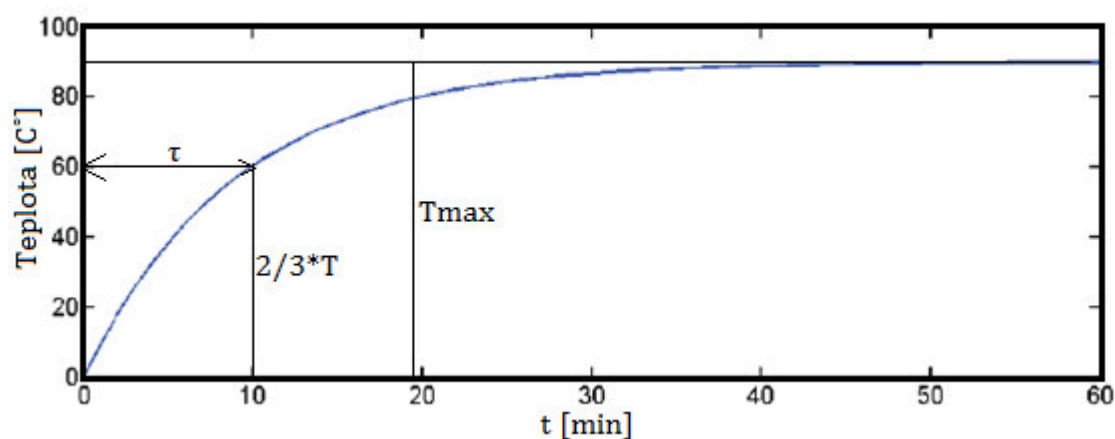
Kde

T	...	teplota v čase t	[K]
T _{max}	...	ustálená teplota stroje	[K]
t	...	čas určení teploty	[s]
τ	...	časová konstanta	[s]

Časová konstanta (τ)

Je čas, za který by stroj dosáhl ustálené teploty bez odvodu tepla.

Příklad oteplovací charakteristiky



Obrázek 9: Oteplovací charakteristika

7.2 Ochlazovací charakteristika

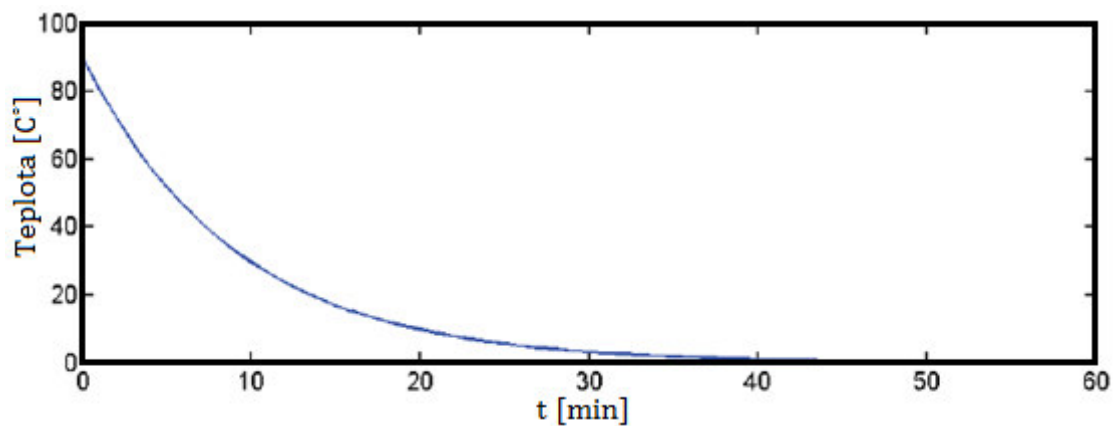
Průběh ochlazovacích charakteristik má většinou exponenciální tvar. Teplota klesá od hodnoty teploty zahřání k teplotě okolí. Tento jev je dán fyzikálními zákony o výměně tepla. Těleso bez aktivního tepelného zdroje si časem vyrovná teplotu s teplotou okolí. Ochlazovací charakteristika je dána vztahem:

$$T = T_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [K] \quad (7.2)$$

Kde

T	...	teplota v čase t	[K]
T _{max}	...	ustálená teplota stroje	[K]
t	...	čas určení teploty	[s]
τ	...	časová konstanta	[s]

Příklad ochlazovací charakteristiky



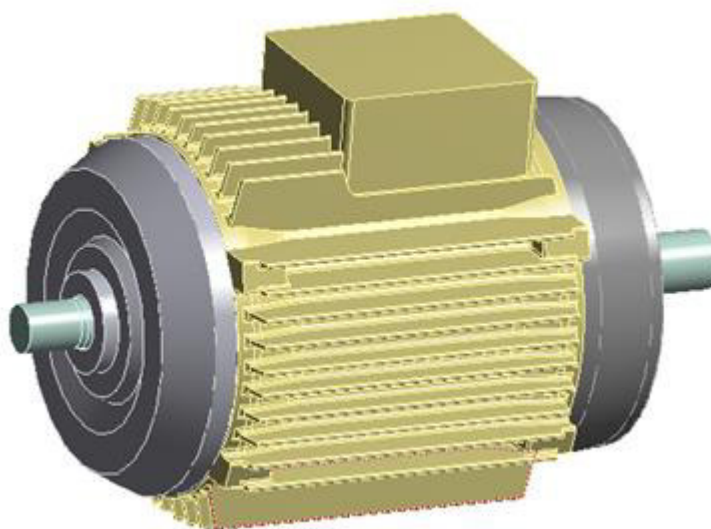
Obrázek 10: Ochlazovací charakteristika

8 MĚŘENÍ

8.1 Simulace v programu Ansys

Vytvoření modelu a nastavení analýzy

Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor 2017 podle reálného motoru. Byla k dispozici výkresová dokumentace, podle které byly jednotlivé části motoru vytvořeny. Potom se všechny části spojili a vytvořil se kompletní model asynchronního motoru.



Obrázek 11: 3D model asynchronního motoru

Po vytvoření 3D modelu motoru se musí celá sestava importovat do programu Ansys Workbench, kde se provede samotná analýza.

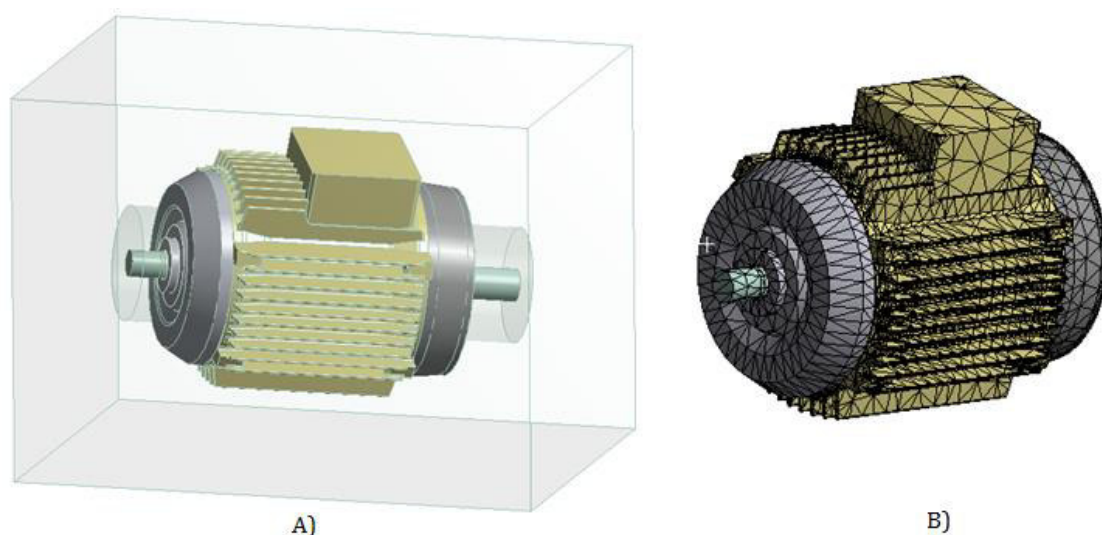
Před začátkem analýzy je třeba z nabídky materiálů vybrat příslušné, které jsou potřeba stroj a okrajové podmínky. Z knihovny materiálů, kterou Ansys obsahuje, byly vybrány měď, hliník, nerezová ocel a konstrukční ocel. Po tomto kroku je potřeba nastavit modul „Geometry“. Zde se vygeneruje importovaný model. Po vygenerování modelu je nutné zkontrolovat nastavené jednotky, aby seděly s hodnotami, ve kterých se vyráběl model motoru. Jako další krok se musí vytvořit kolem motoru vzduchový obal pomocí funkce „Enclosure“. Tato obálka je potřebná pro zadání okrajových podmínek analýzy. Je nutné zvolit správně velikost tohoto obalu, aby se mohla správně provést teplotní analýza. Nesmí být moc malý, ale ani moc velký, aby simulace netrvala moc dlouho.

Nyní je potřeba spustit modul „Model“, ve kterém se již provádí samotná analýza. Ale nejprve je nutné každé části motoru přiřadit daný materiál. Potom se nastaví

okrajové podmínky. Teplota vzduchového obalu, což je okolní ustálená teplota a zdroje tepelné energie. Počáteční teplota se nastaví v „Initial Temperature“ na teplotu, která byla změřena v laboratoři před měřením. Dalším nastavením je celkový čas měření a počet kroků simulace. Vnitřní generace tepla se nastaví ve funkci „Internal Heat Generation“. Ta se nastavuje hodnotou Magnitude, což jsou ztráty v určité části motoru přepočtené na jeden metr krychlový. Hodnoty vnitřní generace tepla jsou v tabulce 4.

Tabulka 4: Hodnoty ztrát a generace tepla

	Objem [m ³]	Ztráty [W]	Magnitude [W/m ³]
Ložiska	$1,912 \cdot 10^{-5}$	5	$2,61 \cdot 10^5$
Statorové plechy	$6,608 \cdot 10^{-4}$	80	$1,21 \cdot 10^5$
Statorové vinutí	$3,684 \cdot 10^{-4}$	120	$3,26 \cdot 10^5$



Obrázek 12: A) Model uzavřený funkcí enclosure B) Model při použití funkce Mesh

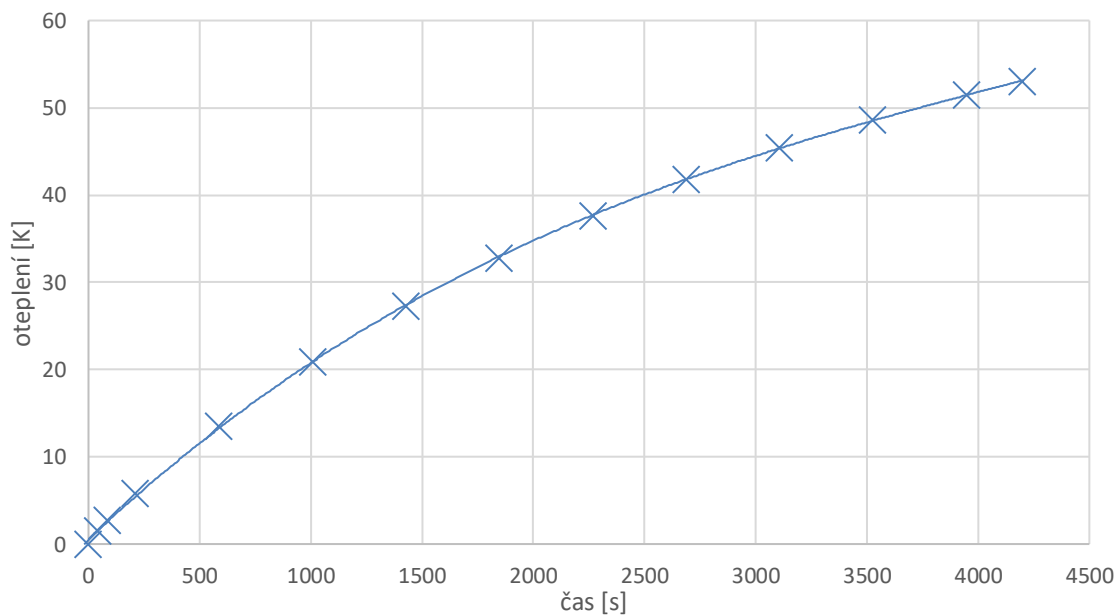
Před provedením analýzy je nutné vytvoření sítě konečných prvků funkcí „Mesh“. Kvůli této funkci bylo potřeba v modelu motoru provést určitá zjednodušení. Protože jinak by vytváření Meshe trvalo moc dlouho. Zjednodušení bylo pouze několik zaoblení částí modelu.

Poslední krok před spuštěním analýzy je výběr typu výstupních hodnot, které jsou žádány, ve funkci „Solution“. Pro tuto práci je nejdůležitější Temperature (teplota), která se je v průběhu analýzy vypočítávána. A taky se zobrazí rozložení teplotního pole v motoru. Pro odečtení přesné hodnoty teploty zde byla použita funkce „Temperature Probe“, což je teplotní sonda, která zaznamenává hodnotu teploty na kostře, která je dále porovnána s hodnotou změřenou na reálném motoru.

Výsledky transientní analýzy

Výpočet teplotního pole motoru bez chlazení

Jako první výpočet transientní analýzy byl proveden na modelu motoru, který nepočítal s chlazením stroje. V grafu lze vidět oteplovací charakteristiku tohoto modelu. Který se po hodině měření oteplil až o 50 K a ustálená maximální teplota stroje by byla přibližně 60 K.

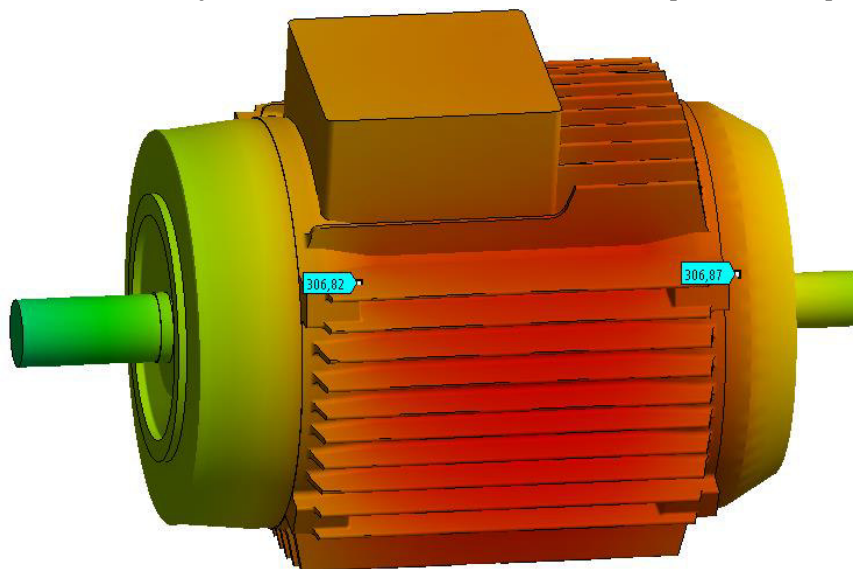


Obrázek 13: Oteplovací charakteristika motoru bez z chlazení

Nedošlo zde sice k úplnému ustálení teploty, ale teplota by už jen nepatrně rostla, dokud by nedosáhla maximální teploty. Dále jsou přiloženy teplotní snímky modelu v různých časech, na kterých lze vidět rozložení teplotního pole.

D: Copy of Transient Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 588
29.5.2017 14:50

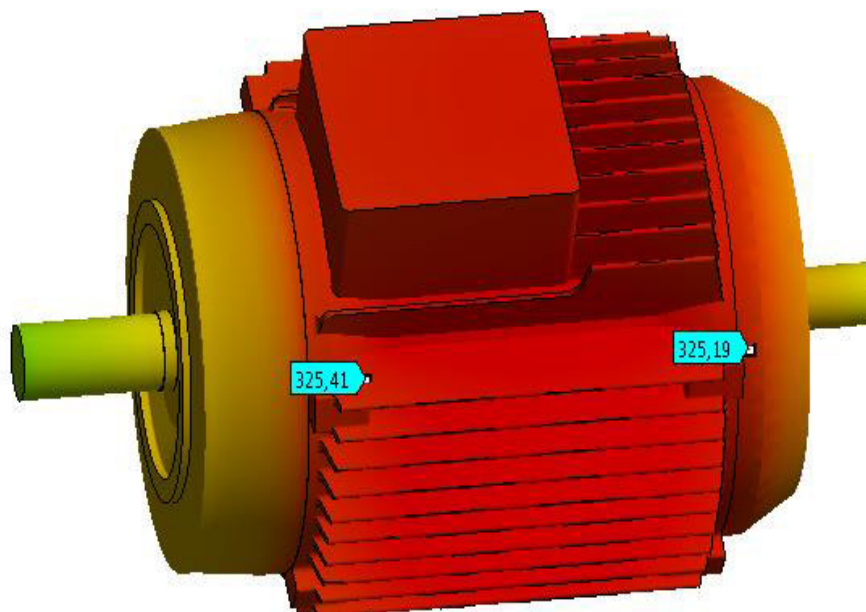
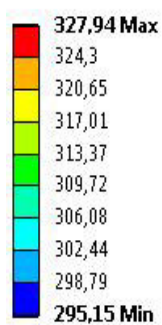
308,71 Max
307,21
305,7
304,19
302,69
301,18
299,67
298,16
296,66
295,15 Min



Obrázek 14: Rozložení teplotního pole v čase t = 588 s

D: Copy of Transient Thermal

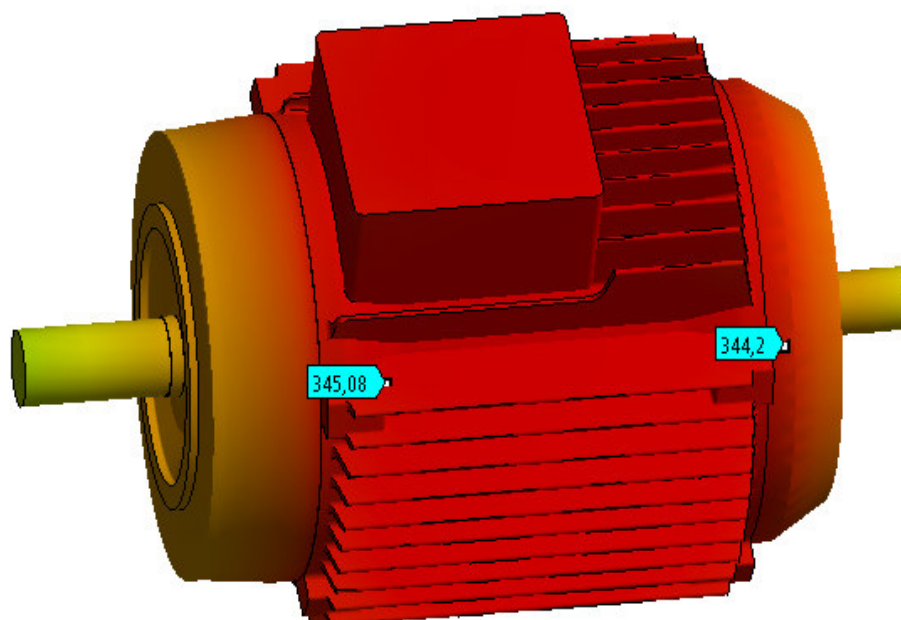
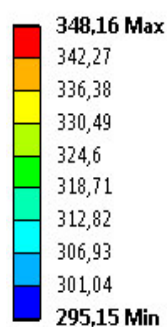
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 1848
29.5.2017 14:24



Obrázek 15: Rozložení teplotního pole v čase $t = 1848$ s

D: Copy of Transient Thermal

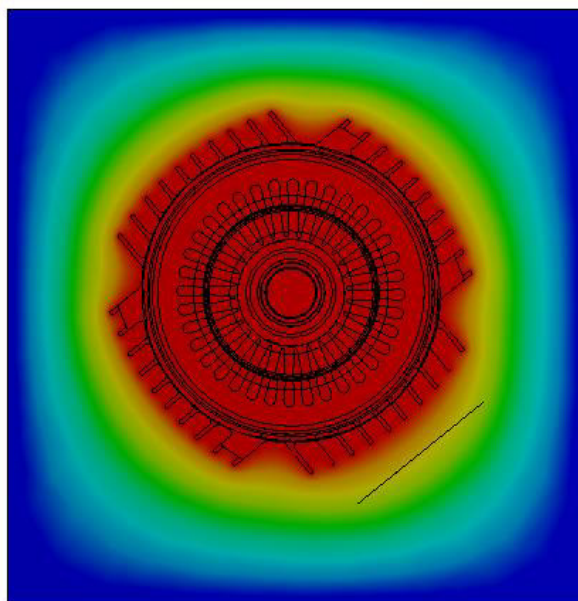
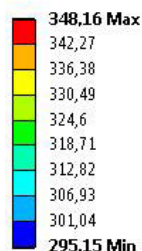
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 4200
29.5.2017 14:21



Obrázek 16: Rozložení teplotního pole v čase $t = 4200$ s

C: Copy of Transient Thermal bez chlazení

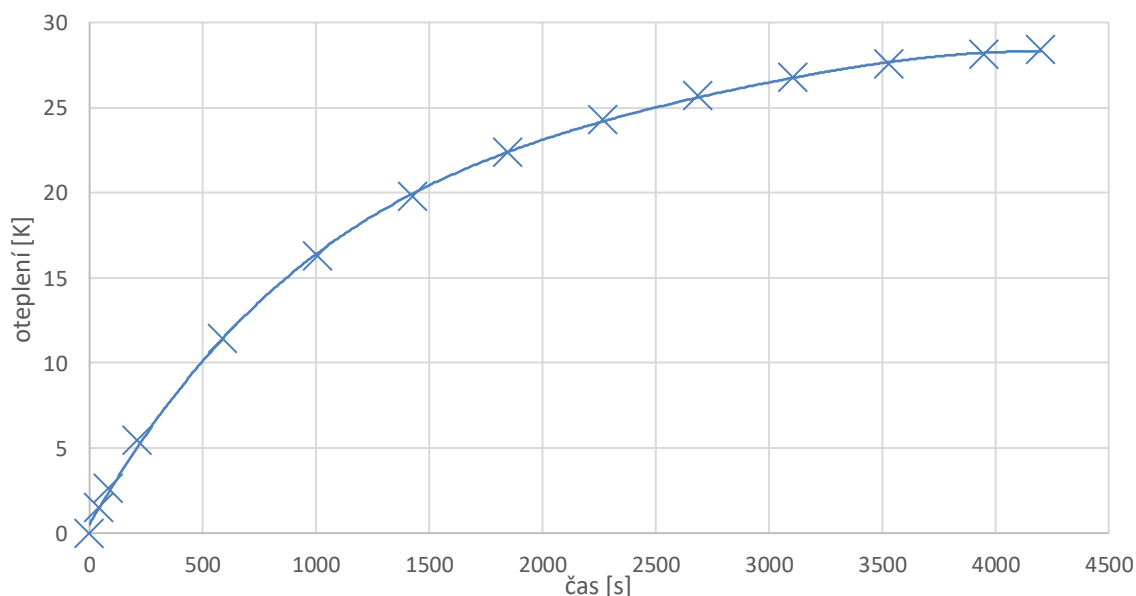
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 4200
29.5.2017 19:52



Obrázek 17: Příčný řez motorem a okolím v čase $t = 4200$ s

Výpočet teplotního pole motoru s chlazením

V tomto výpočtu je chlazení reprezentováno zavedením do okrajových podmínek modelu součinitel přestupu tepla. Tato metoda nebude zcela přesná, protože chlazení je zde rozloženo na povrchu kostry, ale reálně se motor chladí ventilátorem z jedné strany stroje. Ovšem pro přibližné určení teploty tato metoda stačí. Oteplení jednotlivých částí lze vidět z obrázků zachycených v průběhu analýzy. Jako výsledek je přiložena i oteplovací charakteristika.



Obrázek 18: Oteplovací charakteristika motoru

Dále jsou vloženy teplotní snímky pro ukázkou rozložení teplotního pole.

D: Copy of Copy of Transient Thermal chlazeni

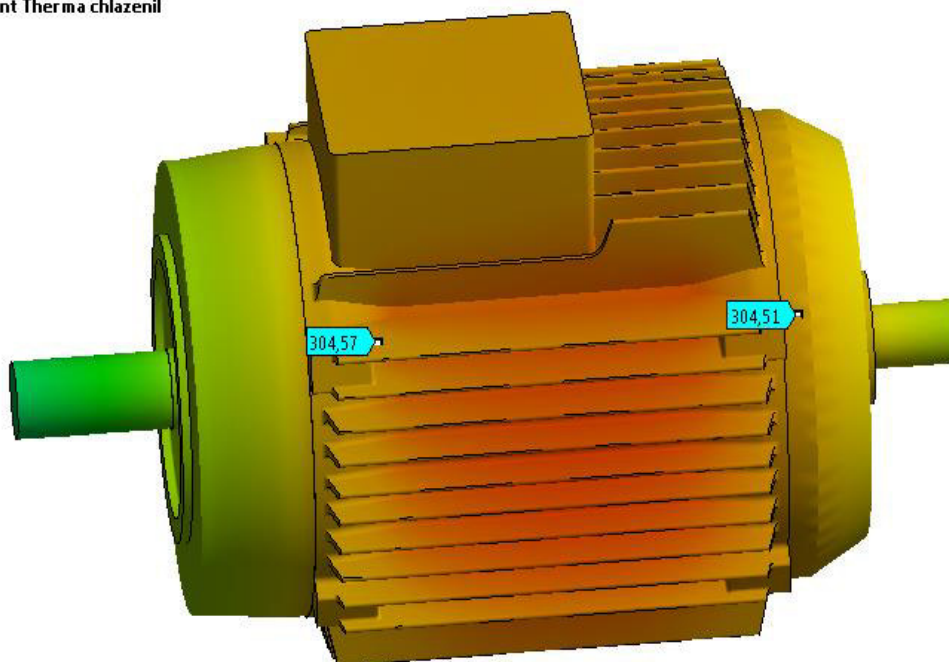
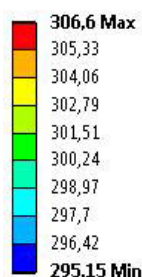
Temperature

Type: Temperature

Unit: K

Time: 588

29.5.2017 19:40



Obrázek 19: Rozložení teplotního pole v čase $t = 588$ s

D: Copy of Copy of Transient Thermal chlazeni

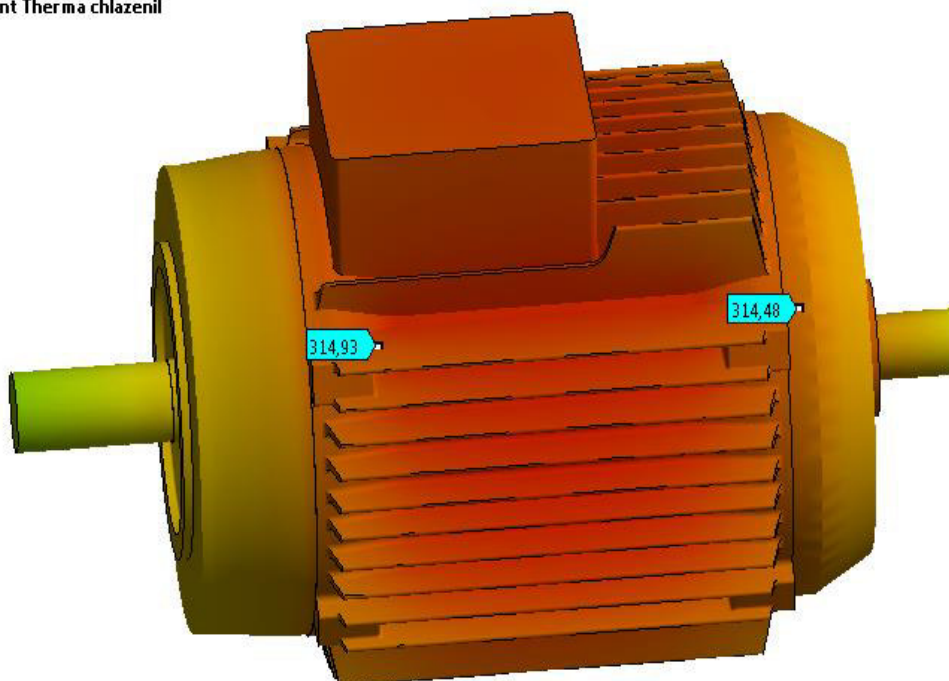
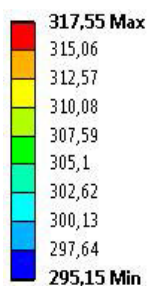
Temperature

Type: Temperature

Unit: K

Time: 1848

29.5.2017 19:41

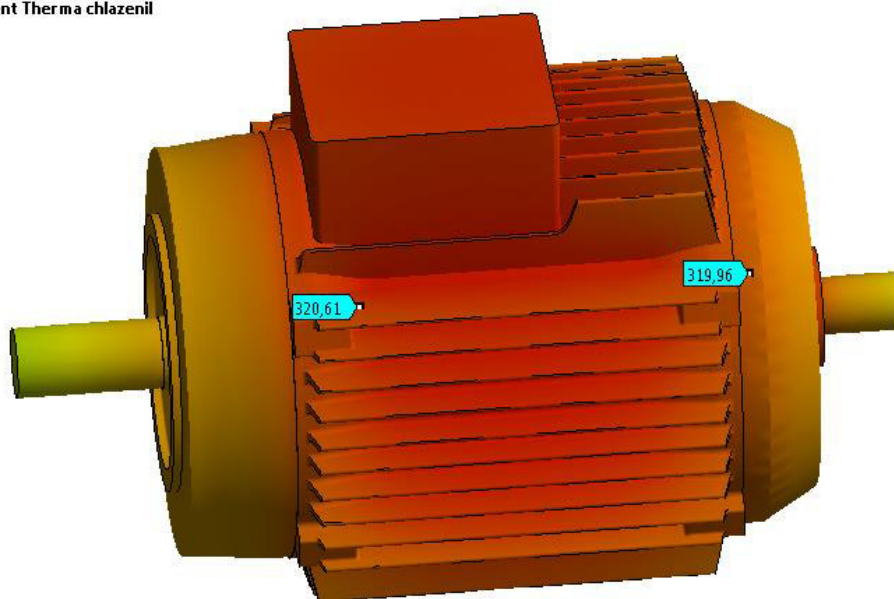


Obrázek 20: Rozložení teplotního pole v čase $t = 1848$ s

D: Copy of Copy of Transient Thermal chlazeni

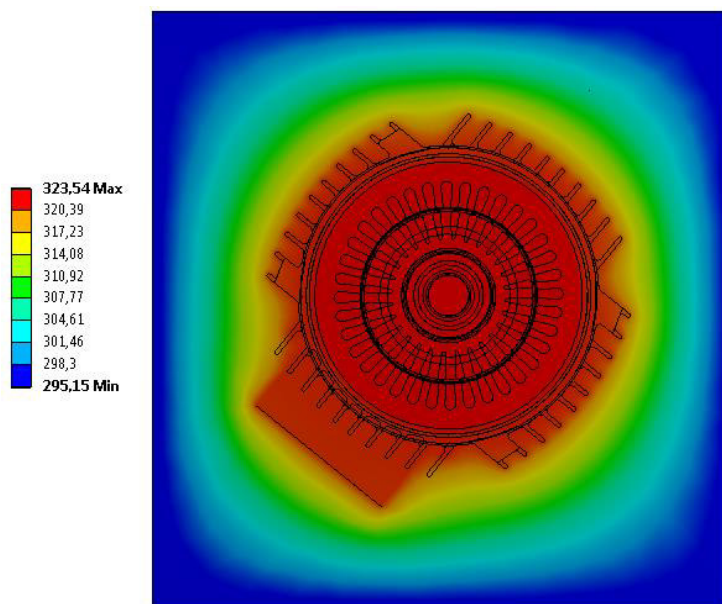
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 4200
29.5.2017 19:42

323,54 Max
320,39
317,23
314,08
310,92
307,77
304,61
301,46
298,3
295,15 Min



Obrázek 21: Rozložení teplotního pole v čase $t = 4200$ s

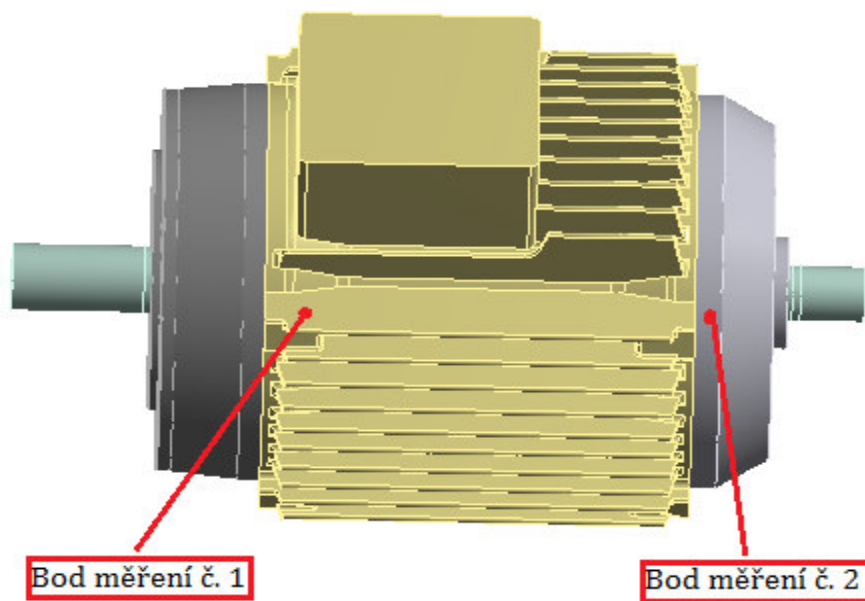
Jako další ukázkou rozložení teploty je zde uveden příčný řez motorem při ustálení teplotě



Obrázek 22: Příčný řez motorem a okolím v čase $t = 4200$ s

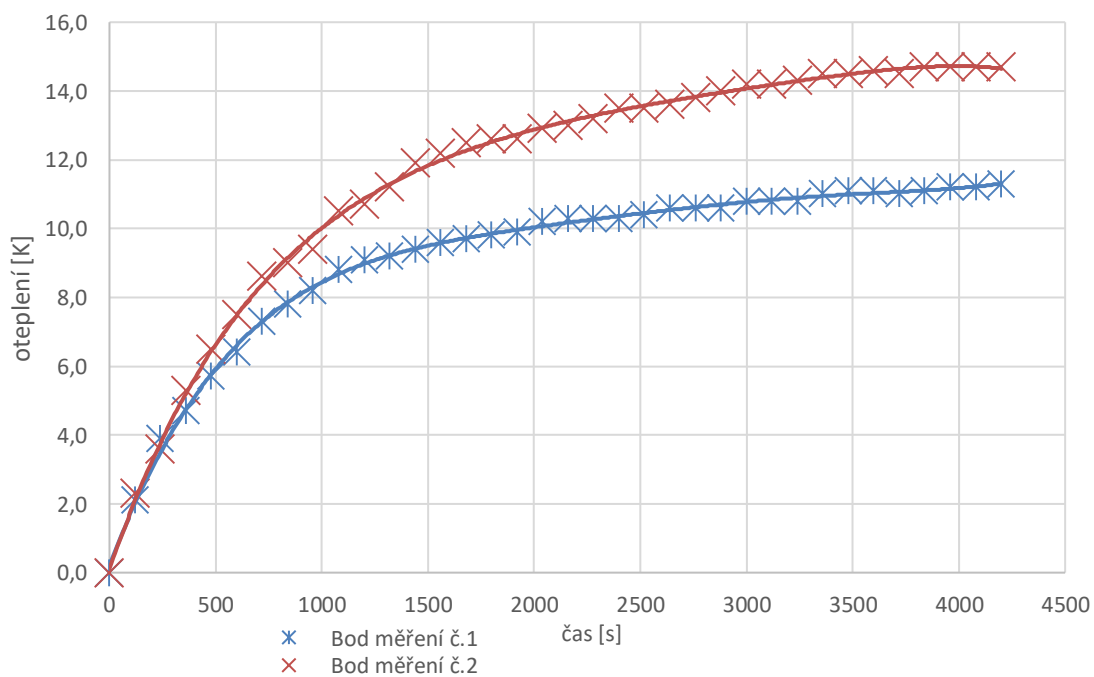
8.2 Měření reálného zatíženého asynchronního motoru

Měření probíhalo na asynchronním motoru v laboratoři. Doba měření byla do přibližného ustálení teploty 4200 s (což je 1 hodina a 10 minut). Motor byl napájen ze zdroje napětím $U=390$ V a proud $I=1,75$ A. Byl zatížen momentem $M=3$ Nm a otáčky byly $n=1475$ min⁻¹. Ustálená teplota v laboratoři byla změřena 22 °C což je $T= 295,15$ K. Teplota byla měřena termočlánkem na dvou místech motoru. Místa měření jsou vyznačena na modelu motoru z programu Ansys Workbench.

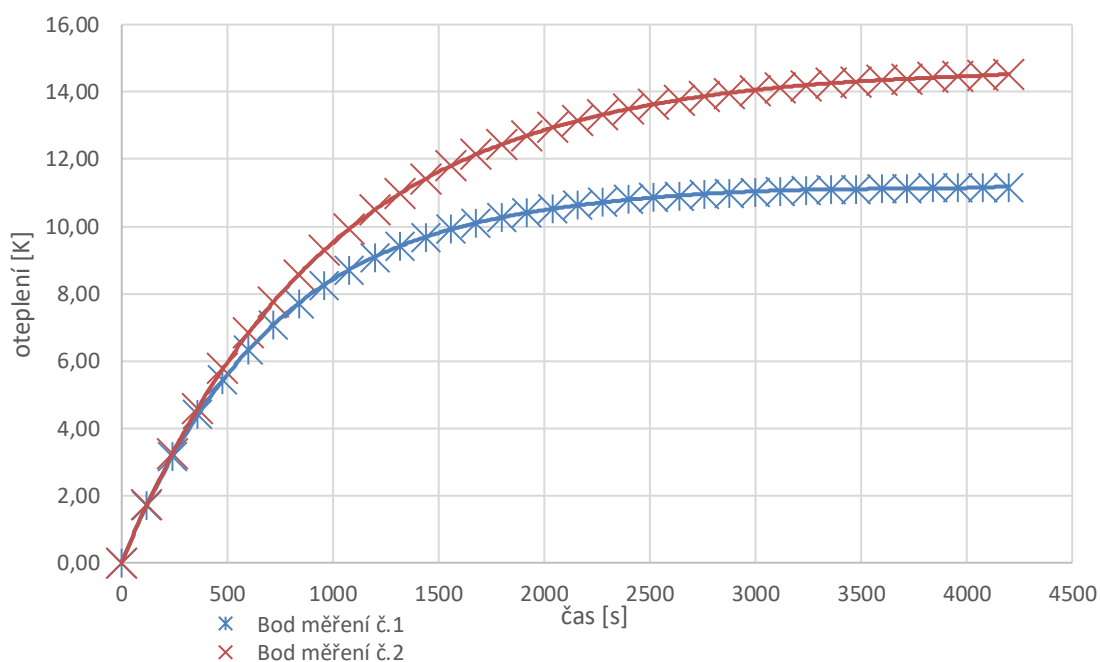


Obrázek 23: 3D model motoru s ukázkou měřících bodů

Měření bylo zaznamenáváno po 120 s. Měření povrchové teploty motoru bylo současně měřeno i termokamerou, z jejíž snímků lze přibližně porovnat změřené hodnoty.

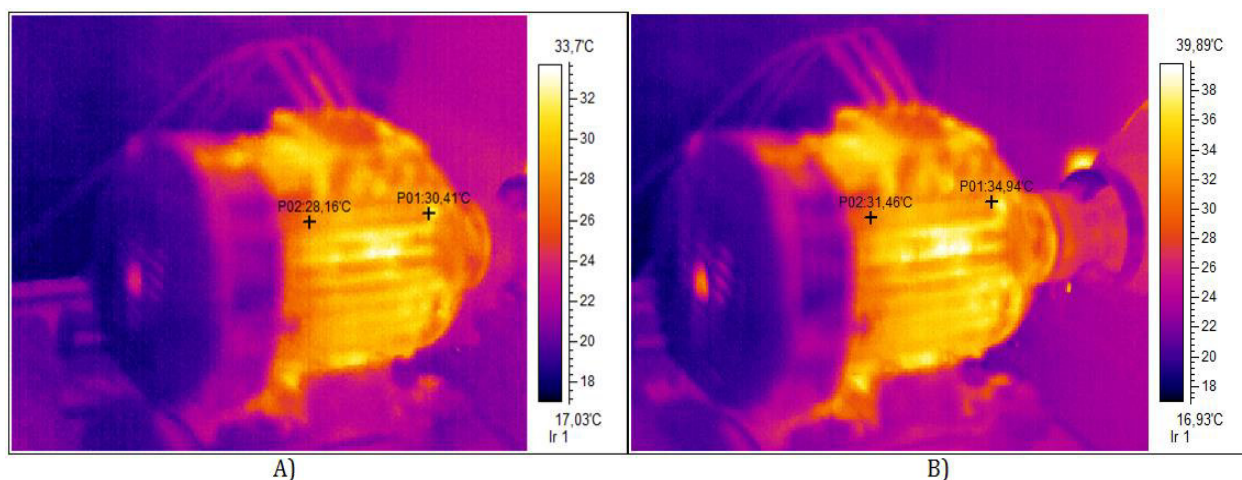


Obrázek 24: Oteplovací charakteristika obou bodů měření



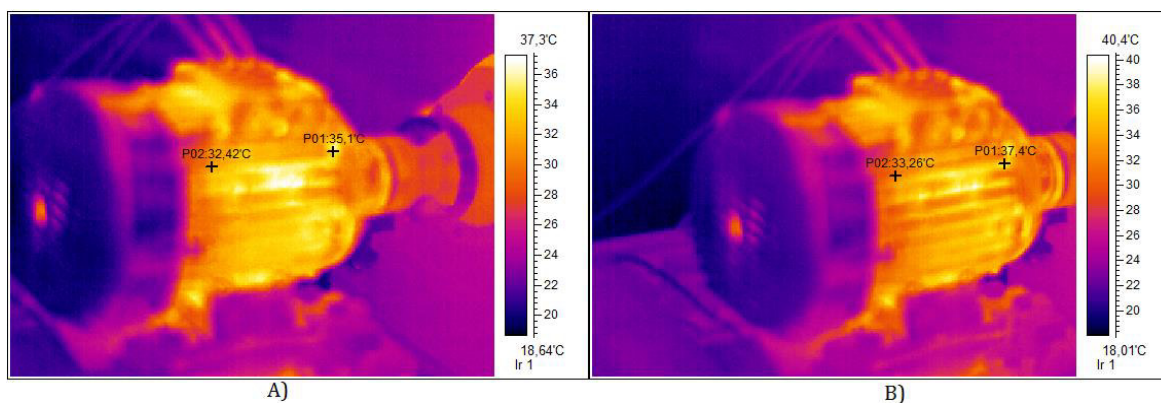
Obrázek 25: Vypočítaná oteplovací charakteristika obou bodů

V dalším grafu jsou teoreticky spočítané oteplovací charakteristiky motoru na základě vypočítané časové konstanty měření a ustálené teploty. Následně bylo dosazeno do vzorce 7.1. Pro porovnání jsou zde vloženy některé snímky z termokamery. Kterými lze přibližně porovnat naměřené hodnoty termočlánkem. Na snímcích je bod měření č. 1 vlevo a bod měření č.2 vpravo. Hodnoty odečtené z termokamery se mírně liší od hodnot změřených termočlánkem, protože na snímku z termokamery nelze úplně přesně určit místo na kterém se měřilo.



Obrázek 26: Snímek z termokamery A) v čase $t = 600$ s

B) v čase $t = 1800$ s



Obrázek 27: Snímek z termokamery A) v čase $t = 3000$ s B) v čase $t = 4200$ s

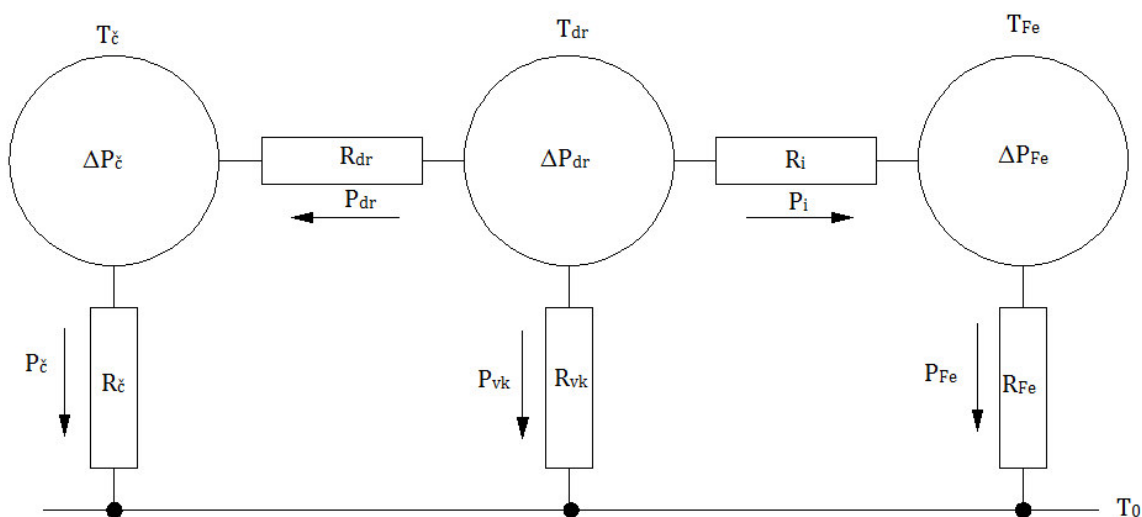
Hodnoty teplot ze snímků termokamery jsou pro přehlednost vloženy do tabulky.

Tabulka 5: Hodnoty teplot ze snímků termokamery

Čas	Teplota v bodě měření č. 1	Teplota v bodě měření č. 2
600 s	301,3 K	303,6 K
1800 s	304,6 K	308,1 K
3000 s	305,6 K	308,3 K
4200 s	306,4 K	310,6 K

8.3 Analytický výpočet teplot

Tento výpočet byl proveden na zjednodušeném modelu asynchronního motoru. Bylo zde uvažováno náhradní tepelné schéma obvodu statoru při konstantní teplotě chladicího vzduchu. Výsledkem jsou hodnoty teplot částí statoru a tepelné toky.



Obrázek 28: Náhradní tepelný obvod statoru při konstantní teplotě okolního vzduchu

Z tohoto schématu dostaneme několik neznámých hodnot. Jsou teploty jednotlivých částí statoru (T_{dr} , $T_{\check{c}}$, T_{Fe}) a tepelné toky ($P_{\check{c}}$, P_{vk} , P_{Fe} , P_{dr} , P_i). Pomocí schématu si vyjádříme soustavu rovnic.

$$\Delta P_{dr} + \Delta P_{\check{c}} + \Delta P_{Fe} = P_{vk} + P_{\check{c}} + P_{Fe} \quad (8.1)$$

$$P_{\check{c}} = \Delta P_{\check{c}} + P_{dr} \quad (8.2)$$

$$P_{Fe} = \Delta P_{dr} + P_i \quad (8.3)$$

$$T_{dr} - T_0 = P_{vk} \cdot R_{vk} \quad (8.4)$$

$$T_{\check{c}} - T_0 = P_{\check{c}} \cdot R_{\check{c}} \quad (8.5)$$

$$T_{Fe} - T_0 = P_{Fe} \cdot R_{Fe} \quad (8.6)$$

$$T_{dr} - T_{\check{c}} = P_{dr} \cdot R_{dr} \quad (8.7)$$

$$T_{dr} - T_{Fe} = P_i \cdot R_i \quad (8.8)$$

Jako další krok je potřeba znát hodnoty tepelných odporů částí statoru. Spočítají se pomocí vzorců z kapitoly 4.3. Výpočty jsou čerpány z literatury [7].

1) Výpočet tepelného odporu drážkové izolace R_i

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i \cdot S_i} = \frac{0,0001}{0,1 \cdot 0,131} = 7,63 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$S_i = Q_i \cdot O_d \cdot l = 24 \cdot 0,037 \cdot 0,147 = 0,131 \text{ m}^2$$

2) Výpočet tepelného odporu čel vinutí $R_{\check{c}}$

$$\alpha_{\check{c}} = 10 \cdot (1 + 0,54 \cdot v^2) = 10(1 + 0,54 \cdot 5^2) = 145$$

$$R_{\check{c}} = \frac{d_{iz}}{\lambda_i S_{\check{c}}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} S_{\check{c}}} = \frac{0,0001}{0,1 \cdot 0,031} + \frac{1}{145 \cdot 0,031} = 0,255 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

3) Výpočet tepelného odporu železa statoru ku chladicímu vzduchu R_{Fe}

$$\alpha_{ir} = \frac{\lambda}{2 \cdot \delta} = \frac{0,027}{2 \cdot 0,001} = 13,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$$

$$R_{Fe} = \frac{1}{\alpha_{er} \cdot S_{er} + \alpha_{ir} \cdot S_{ir}} = \frac{1}{20 \cdot 0,056 + 13,3 \cdot 0,036} = 0,625 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Pro všechny výpočty tepelných odporů jsou v následující tabulce uvedeny všechny použité hodnoty.

Tabulka 6: Hodnoty pro výpočet tepelných odporů

Tepelný odpor drážkové izolace	Značení	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti	λ_i	0,1	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Tloušťka drážkové izolace	d_{iz}	0,0001	[m]
Plocha izolace	S_i	0,131	[m ²]
Obvod drážky	O_d	0,037	[m]
Počet drážek	Q_i	24	[-]
Délka železa	l	0,147	[m]
Tepelný odpor železa statoru k chladicímu vinutí	Značení	Hodnota	Jednotka
Součinitel přestupu tepla vnějšího povrchu paketů	α_{er}	20	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
Vnější povrch paketů	S_{er}	0,056	[m ²]
Součinitel přestupu tepla vnitřního povrchu paketů	α_{ir}	13,3	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
Vnitřní povrch paketů	S_{ir}	0,036	[m ²]
Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	λ	0,027	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Délka vzduchové mezery	δ	0,001	[m]
Tepelný odpor čel vinutí	Značení	Hodnota	Jednotka
Tloušťka izolace cívky	d_{iz}	0,0001	[m]
Ochlazovací plocha čel	$S_{\check{c}}$	0,31	[m ²]
Součinitel tepelné vodivosti izolace	λ_i	0,1	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Součinitel přestupu tepla	$\alpha_{\check{c}}$	145	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

Následně je potřeba vypočítat ztráty v čelech vinutí a ztráty drážkové části. To lze spočítat díky poměrnému přepočtu vůči celému vinutí. A hned v dalším kroku se vypočítají ztráty drážkové části statoru.

$$\Delta P_{\check{c}} = \frac{\Delta P_v \cdot V_{\check{c}}}{V_v} = \frac{120 \cdot 9,8 \cdot 10^{-5}}{3,684 \cdot 10^{-4}} = 31,92 \text{ W}$$

$$\Delta P_{dr} = \Delta P_v - \Delta P_{\check{c}} = 120 - 31,92 = 88,1 \text{ W}$$

Protože tento model se uvažuje bez vyrovnávacího tepelného toku, z důvodu absence radiálních ventilačních kanálů, víme že $P_{vk} = 0 \text{ W}$. Díky tomuto zjednodušení a použití vztahu 4.11 se předpokládá $T_{dr} = T_0$.

Následně je možné vyjádřit teplotu železa použitím opět vztahu 4.11

$$T_{Fe} - T_0 = P_{Fe} \cdot R_{Fe} \Rightarrow T_{Fe} = P_{Fe} \cdot R_{Fe} + T_0$$

Tepelný tok železa se vyjádří vztahem 8.3 a následně se za tepelná tok procházejícími stěnami drážek dosadí vztah 8.8. Výsledný vztah je:

$$T_{Fe} = \left(\frac{(T_{dr} - T_{Fe})}{R_i} + \Delta P_{Fe} \right) \cdot R_{Fe} + T_0$$

Tuto rovnici je potřeba upravit do vhodného tvaru:

$$\begin{aligned} T_{Fe} &= \frac{T_{dr} \cdot R_{Fe} + R_i \cdot R_{Fe} \cdot \Delta P_{Fe} + T_0 \cdot R_i}{R_{Fe} + R_i} \\ &= \frac{295,15 \cdot 0,625 + 0,00763 \cdot 0,625 \cdot 80 + 295,15 \cdot 0,00763}{0,625 + 0,00763} = 296,3 \text{ K} \end{aligned}$$

Tepelný tok železa je nyní možné spočítat ze vztahu 8.6

$$P_{Fe} = \frac{T_{Fe} - T_0}{R_{Fe}} = \frac{296,3 - 295,15}{0,625} = 1,84 \text{ W}$$

Tepelné toky čel vinutí lze vyjádřit ze vztahu 8.1, kde $P_{vk}=0$

$$P_{\Sigma} = \Delta P_{dr} + \Delta P_{\Sigma} + \Delta P_{Fe} - P_{vk} - P_{Fe} = 88,1 + 31,92 + 80 - 0 - 1,84 = 198,18 \text{ W}$$

Díky této hodnotě jsou spočítány teploty čel vinutí ze vztahu 8.5

$$T_{\Sigma} = P_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} + T_0 = 198,18 \cdot 0,255 + 295,15 = 345,69 \text{ K}$$

Následně je spočítán tok drážkového vinutí statoru z rovnice 8.2

$$P_{dr} = P_{\Sigma} - \Delta P_{\Sigma} = 198,18 - 31,92 = 166,3 \text{ W}$$

Poslední neznámou, tepelný tok procházející stěnami drážek statoru, se spočítá ze vztahu 8.8

$$P_i = \frac{T_{dr} - T_{Fe}}{R_i} = \frac{295,15 - 296,3}{0,00763} = -150,7 \text{ W}$$

Všechny vypočtené hodnoty z analytického výpočtu jsou uvedeny v tabulce 6.

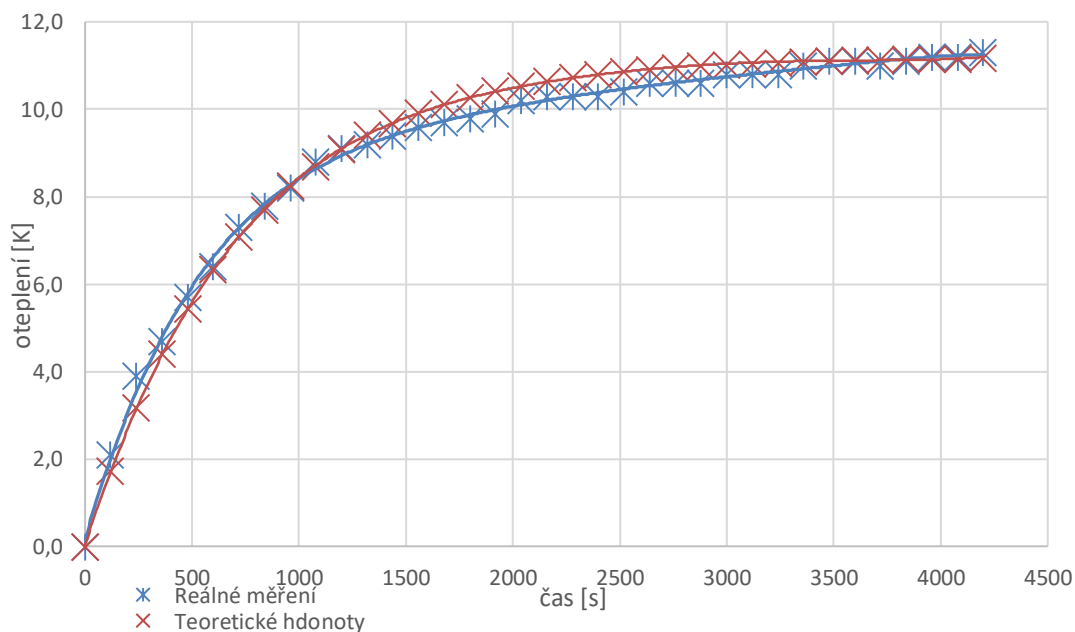
Tabulka 7: Vypočtené hodnoty teplot a tepelných toků

Teploty		
Veličina	Značení	Vypočtená hodnota
Teplota okolí a drážkové části vinutí	T_0, T_{dr}	295,15 K
Teplota železa statoru	T_{Fe}	296,3 K
Teplota čel vinutí statoru	$T_{\check{c}}$	345,96 K
Tepelné toky		
Veličina	Značení	Vypočtená hodnota
Tepelný tok od statoru	P_{Fe}	1,84 W
Tepelný tok z drážkové izolace	P_{dr}	166,3 W
Tepelný tok z povrchu čel	$P_{\check{c}}$	198,18 W
Tepelný tok stěnami drážek	P_i	-150,7 W

9 SROVNÁNÍ METOD

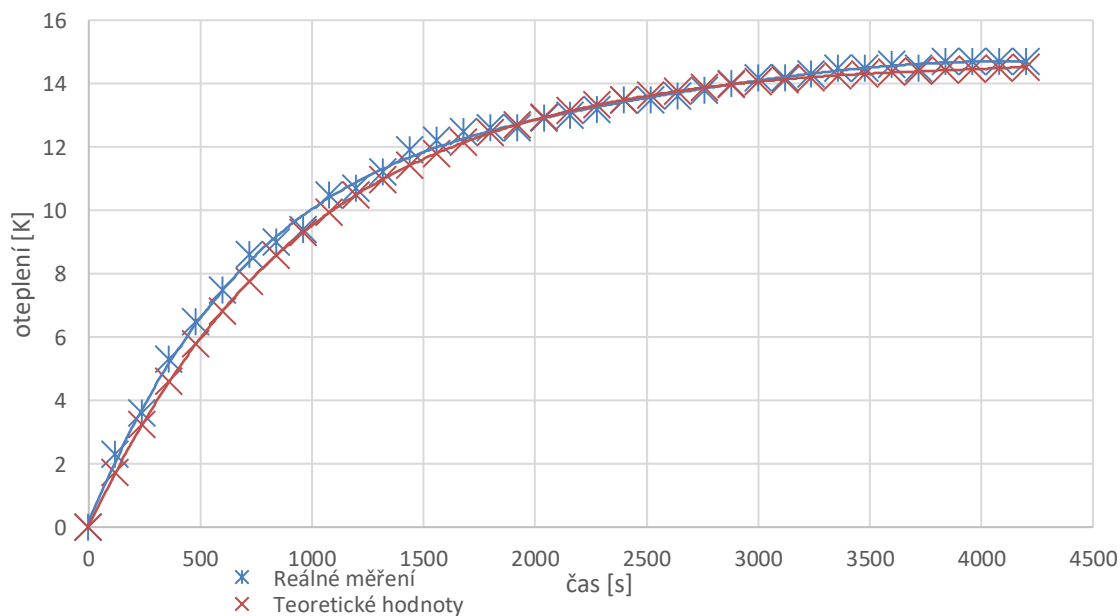
Srovnání změřené a vypočtené oteplovací charakteristiky

Jako první srovnání je zde průběh oteplení v bodu měření č.1. V grafu jsou porovnávány hodnoty změřené a následně vypočtené teoretické hodnoty podle vztahu 7.1.



Obrázek 29: Porovnání reálné a teoretické oteplovací charakteristiky v bodě měření č.1

Z grafu lze vidět, že jsou naměřené a spočítané hodnoty oteplení téměř stejné a liší se pouze v desetinách K. V dalším obrázku je opět porovnání měřené a teoretické hodnoty bodě měření č.2.

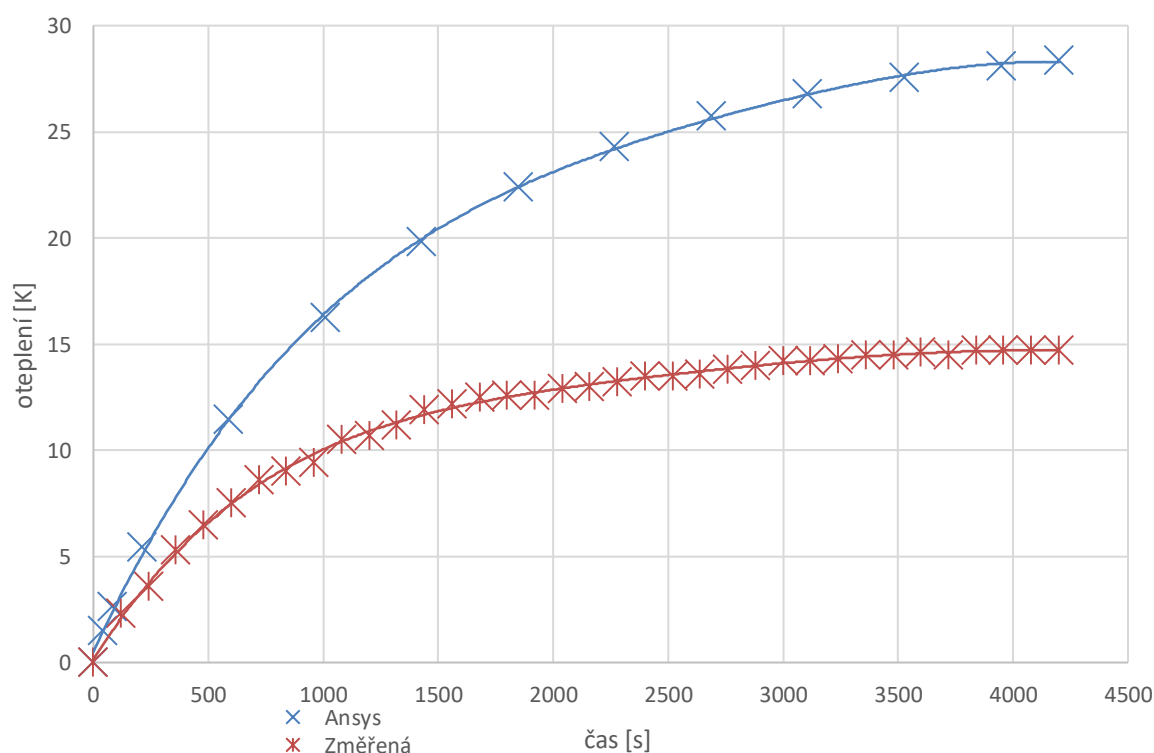


Obrázek 30: Porovnání reálné a teoretické oteplovací charakteristiky v bodě měření č.2

I ve druhém bodě měření jsou průběhy oteplení téměř stejné. Je vidět, že lze použít tento teoretický vzorec pro výpočet oteplení. Ale je důležité znát časovou konstantu τ .

Srovnání analýzy z Ansys a laboratorního měření

Toto srovnání je provedeno měřením daného bodu na povrchu motoru. Jako přesnější se zde musí brát měření v laboratoři, protože při analýze v Ansys bylo chlazení reprezentováno součinitelem přestupu tepla jako okrajová podmínka. Teplo se tedy po modelu rozkládalo rovnoměrně. Na reálném motoru se stroj chladí z jedné strany. Ochlazovací vzduch tedy proudí z jedné strany na druhou, takže teplota na povrchu není rovnoměrně rozložená. Další nepřesnosti ve výpočtu metodou konečných prvků v Ansys jsou způsobeny zjednodušením některých částí 3D modelu a taky nebyly známy přesné materiály elektrického stroje. Dále nebyly přesně určeny hodnoty generování tepla při zatížení motoru z důvodu časové náročnosti. V následujícím grafu je srovnání teplotních charakteristik.

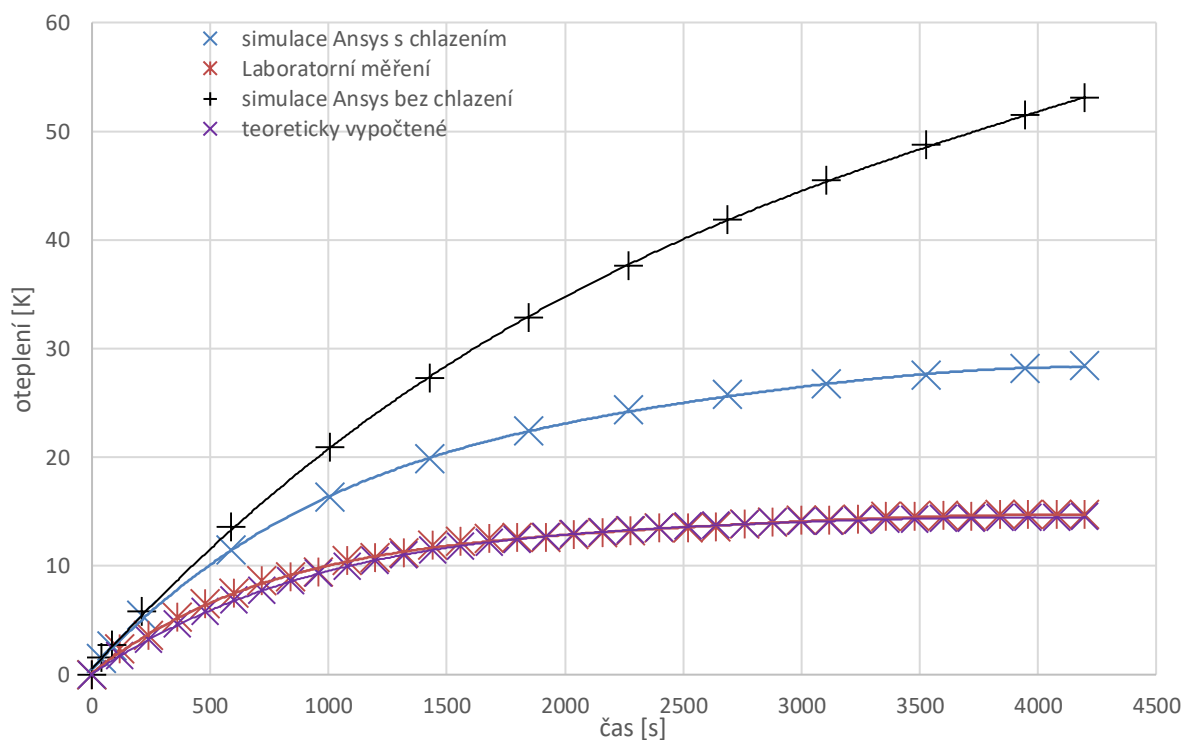


Obrázek 31: Srovnání oteplovacích charakteristik z laboratorního měření a ze simulace v Ansys

Lze vidět rozdíl při ustálené teplotě skoro 14 K. Tento rozdíl je způsoben nepřesným zadáním všech hodnot simulačnímu programu Ansys.

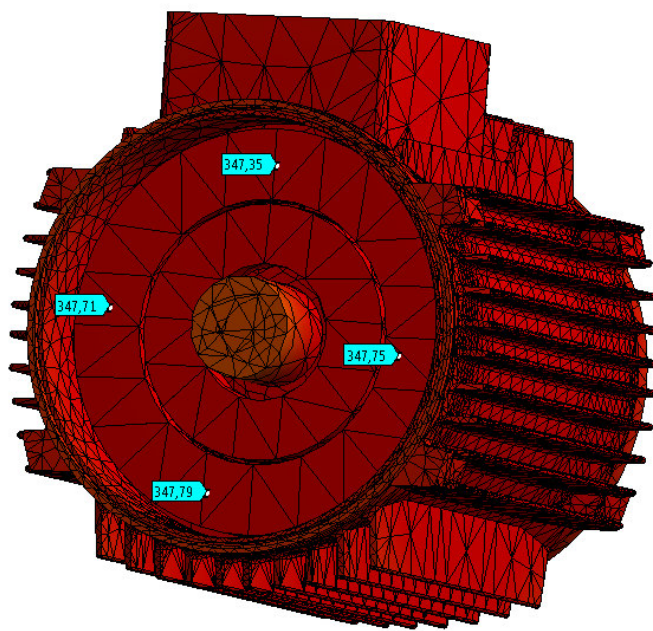
Porovnání všech vypočtených a naměřených hodnot

V grafu jsou vloženy oteplovací charakteristiky z měření, teoreticky vypočítané a ze simulací Ansys.



Obrázek 32: Srovnání všech oteplovacích charakteristik

Srovnání vypočtených hodnot metodou teplotních odporů s analýzou Ansys



Obrázek 33: Teplota čel vinutí motoru

Zde je srovnána pouze teplota čel vinutí, protože ze zjednodušeného modelu je pouze tato hodnota relevantní. Výsledná spočítaná hodnota čel vinutí vyšla $T_{\text{č}} = 345,96 \text{ K}$. Výstupní hodnota z teplotní analýzy v Ansys je vidět v následujícím obrázku. Hodnota teploty vinutí je změřena funkcí „Probe“. Průměrná hodnota teploty zde vyšla $T_{\text{čAnsys}} = 347,65 \text{ K}$. Obě tyto hodnoty však nejsou zcela přesné, protože v obou případech se počítalo se zjednodušeními.

ZÁVĚR

Cíl této bakalářské práce byl seznámit se s metodami výpočtu, které se používají pro výpočty teplotních polí v elektrických strojích. Protože při návrhu nebo konstrukci kteréhokoliv elektrického stroje je velice důležité dát si pozor na teploty, které by se tam mohli vyskytnout. Překročení maximální dovolené teploty stroje má špatný vliv na chod motoru a může ho dokonce zničit. Proto se provádí výpočty teplotních polí, aby se předešlo možnému poruše a taky snížily náklady na výrobu.

Pro tuto práci byl základem asynchronní motor, který byl měřen a zároveň byl vytvořen 3D model, na kterém se prováděly teplotní analýzy v programu Ansys Workbench, který k výpočtu používá metodu konečných prvků. Metodou konečných prvků lze docílit přesných výsledků a taky přímo rozložení teplotního pole ve všech částech stroje. Ale je potřeba znát všechny použité materiály v částech motoru a přesné hodnoty generace tepla dané části. Tyto hodnoty je těžké zjistit, a proto byly použity přibližné hodnoty používané v praxi. Dalším důležitým faktorem je fakt, že teplo je v reálu odváděno z motoru jinak než v simulaci. To je dáno například parametry vzduchu okolo stroje a jeho oteplení v čase. Ovšem jako hlavní rozdíl hodnot simulací Ansys a reálného měření byl zde fakt, že 3D model, určený k analýze v Ansys, neměl ventilátor, ale chlazení zde bylo vytvořeno použitím okrajové podmínky. Kde se započítal součinitel přestupu tepla, který měl sloužit pro simulaci jako chlazení stroje.

Další metodou výpočtu pro porovnání byl analytický výpočet metodou teplotních odporů. Tento výpočet vychází pouze ze zjednodušeného náhradního tepelného obvodu statoru. Takže tyto hodnoty jsou pouze orientační, protože se zde nepočítá s rotorem, kostrou, nebo vzduchovou mezerou. Ale i přes hodně zjednodušený postup zde vyšly téměř stejné hodnoty teploty čel vinutí, jako hodnoty, které vyšly simulací v teplotní analýze v Ansys.

Porovnáním všech metod lze říct, že sice všechny metody se dají použít při návrhu nových motorů, ale velice záleží na parametrech, které jsou známy a na dalších faktorech. Jako nejlepší metoda je nespíš v programu Ansys Workbench. Přesnost je zde ovlivněna správností zadaných parametrů do simulace. Ale nejvýhodnější možnost je zde možnost vidět rozložení teplotního pole kdekoli v motoru.

Literatura

- [1] ONDRŮŠEK, Čestmír. Elektrické stroje. VUT, 79 s. Skriptum. VUT
- [2] SUK, Jiří. *VÝPOČET TEPLŮTNÍHO POLE ASYNCHRONNÍHO MOTORU* [online]. Brno, 2015 [cit.2016-11-21]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102494
- [3] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [4] HERR, Tomáš. *MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69843
- [5] Tepelné vlastnosti. *Centrum experimentální geotechniky* [online]. 2014 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://ceg.fsv.cvut.cz/vyuka/podklady-pro-studenty/definice-parametru/tepelne-vlastnosti>
- [6] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. Řada elektrotechnické literatury.
- [7] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [8] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
- [9] ZÁRUBA, Jan. *VÝPOČET CHLAZENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88738
- [10] VOLF, Ivo, Miroslava JAREŠOVÁ a Miroslav OUHRABKA. *Přenos tepla* [online]. In: . s. 15-30 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [11] JANDA, Marcel. *TEPLŮTNÍ OPTIMALIZACE ČÁSTÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ* [online]. Brno, 2008 [cit.2016-11-21]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10266
- [12] VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. Metoda konečných prvků. Metoda konečných prvků [online]. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z:
http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf

Seznam symbolů, veličin a zkratek

C	$[J.K^{-1}]$	tepelná kapacita
c	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
d_{iz}	$[m]$	tloušťka drážkové izolace
f	$[Hz]$	frekvence
I	$[A]$	proud
$l_{\check{c}}$	$[m]$	délka čela
l	$[m]$	osová délka železa statoru
m_1	$[-]$	počet fází
m	$[kg]$	hmotnost
P_1	$[W]$	příkon
P_2	$[W]$	výkon na hřídeli
P_{Fe}	$[W]$	Tepelný tok od statoru
P_{dr}	$[W]$	tepelný tok drážkového vinutí
P_i	$[W]$	tepelný tok stěnami drážek
P_{mech}	$[W]$	mechanický výkon
P_r	$[W]$	výkon vyzařujícího tělesa
P_{vk}	$[W]$	vyrovnávací tepelný tok
P_{δ}	$[W]$	výkon na vzduchové mezeře
Q	$[J]$	teplo
Q_T	$[W]$	tepelný tok
R	$[W]$	odpor vinutí
$R_{\check{c}}$	$[K.W^{-1}]$	tepelný odpor čel vinutí
R_{Fe}	$[K.W^{-1}]$	tepelný odpor železa k chladicímu vzduchu
R_i	$[K.W^{-1}]$	tepelný odpor drážkové izolace
R_v	$[K.W^{-1}]$	tepelný odpor kovu vinutí
R_{vk}	$[K.W^{-1}]$	tepelný odpor od vinutí k chladicímu mediu
R_{δ}	$[K.W^{-1}]$	tepelná vazba mezi statorem a rotorem
S	$[m^2]$	plocha stěny
$S_{\check{c}}$	$[m^2]$	ochlazovací plocha čel
S_{ef}	$[m^2]$	průřez vodiče
S_{er}	$[m^2]$	vnější povrch paketů
S_i	$[m^2]$	plocha izolace
S_{ir}	$[m^2]$	vnitřní povrch paketů
S_{vk}	$[m]$	plocha povrchu vinutí v radiálních kanálech

T	[K]	termodynamická teplota
T_1	[K]	počáteční teplota
T_2	[K]	koncová teplota
$T_{\check{c}}$	[K]	teplota čel stroje
T_{dr}	[K]	teplota drážkového vinutí
T_{Fe1}	[K]	teplota železa statoru
T_{Fe2}	[K]	teplota železa rotoru
V_{ef}	[m]	počet efektivních vodičů v drážce
α	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
α_{er}	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	souč. př. tepla vnějšího povrchu paketů
α_{ir}	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	souč. př. tepla vnitřního povrchu paketů
α_{δ}	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla vzduch. mezery
λ_i izolace	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
$\vartheta_{\check{c}}$	[K]	teplota čel vinutí
ΔP_j	[W]	Joulovy ztráty na vinutích
ΔP_d	[W]	ztráty dodatečné
ΔP_{Fe}	[W]	ztráty v železe
ΔP_H	[W]	hysterezní ztráty
ΔP_V	[W]	ztráty vířivými proudy
ΔP_{mech}	[W]	ztráty mechanické
ΔP	[W]	celkové ztráty ve vinutí
δ	[m]	šířka vzduchové mezery
ε	[-]	emisivita
η	[-]	účinnost stroje
σ	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta